

Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen als Grundlage des sicheren Betriebs
von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in
städtischer Umgebung

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik der
Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Andreas Christian Reschka

aus Traunstein

eingereicht am: 12.08.2016

mündliche Prüfung am: 12.05.2017

1. Referent: Professor Dr.-Ing. Markus Maurer
2. Referent: Professor Dr.-Ing. Jürgen Rüdiger Böhmer
3. Referent: Professor Dr. rer. nat. Hermann Winner

Druckjahr 2017

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technik der Universität Hildesheim und dem Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig sowie als Stipendiat der Daimler und Benz Stiftung im Projekt Villa Ladenburg. Die Entstehung der vorliegenden Arbeit war für mich eine spannende Reise auf der mir viele interessante Menschen begegnet sind.

Im Jahr 2009, zu Beginn meiner Zeit im Projekt Stadtpilot, stellte mir Jörn Marten Wille die Frage nach meinem Forschungsschwerpunkt. Ich hatte die Wahl zwischen der kamera-basierten Bildverarbeitung und dem Themenbereich der Sicherheit für den Versuchsträger Leonie. Ohne genau zu wissen was mich erwartet, entschied ich mich für die Sicherheit und bin bis zum heutigen Tag dabei geblieben. Ich bedanke mich herzlich bei den mittlerweile ehemaligen Stadtpiloten Jörn Marten Wille, Tobias Nothdurft, Falko Saust, Sebastian Ohl, Richard Matthaei, Sven Böhme und Bernd Lichte, die mich damals freundlich in das Team aufgenommen haben.

Aus meiner Zeit als Student und wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Hildesheim bedanke ich mich herzlich bei Annika Miehe, Gerald Lauer, Beate Sperling-Grund, Jörg Kaschkat, Nils Habich, Tanja Roth, Oliver Günther und Prof. Eberhard Schwarzer. Ich freue mich, dass wir uns zumindest gelegentlich noch über den Weg laufen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Jürgen Rüdiger Böhmer, der mich direkt nach meiner Masterarbeit in das damals noch Physik und Technik genannte Institut aufgenommen hat und mir die Freiheit zur Wahl eines Themas und eines Projekts für meine Dissertation gegeben hat. Ich freue mich, dass Sie auch nach meinem Weggang im September 2013 ohne zu zögern die Rolle des zweiten Berichterstatters übernommen haben.

Für die Zeit im Projekt Villa Ladenburg der Daimler und Benz Stiftung bedanke ich mich bei allen beteiligten Expertinnen und Experten und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Daimler und Benz Stiftung herzlich. Der Austausch im Projekt hat mir wertvolle Impulse für die vorliegende Arbeit gegeben.

Herzlichen Dank an Herrn Prof. Hermann Winner für die zahlreichen Kommentare und Anmerkungen im Rahmen des Projekts Villa Ladenburg und bei diversen Konferenzen und Workshops. Ich freue mich, dass Sie sich ebenfalls ohne zu zögern als Berichterstatter für meine Dissertation bereitgestellt haben.

Für die Diskussionen, Anregungen, Kritik und Unterstützung in den letzten zwei Jahren am Institut für Regelungstechnik bedanke ich mich herzlichst bei meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen Fabian Schuldt, Gerrit Bagschik, Richard Matthaei, Bernd Lichte, Simon Ulbrich, Jens Rieken, Martin Escher, Marcus Nolte, Torben Stolte, Till Menzel, Stefanie Scheffer, Veronika Krapf, Johanna Rieke, Jan Timo Wendler, Horea Cernat, Peter Bergmiller und Susanne Ernst.

Herr Prof. Markus Maurer hat mir in den letzten Jahren stets mit Rat, Tat und Kritik die richtigen Impulse gegeben und mir die Forschung im Projekt Stadtpilot ermöglicht. Ich bedanke mich herzlichst für die schöne Zeit in den verschiedenen Projekten und für die wissenschaftliche Betreuung während meiner Promotionszeit.

Abschließend bedanke ich mich ganz besonders bei meiner Familie und meinen Freunden für ihr Verständnis und ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht.

Ich freue mich schon auf die Fortsetzung meiner Reise.

Braunschweig im Juni 2017

Andreas Christian Reschka

Kurzfassung

Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung

In den vergangenen Jahren haben zahlreiche Projekte zur Erforschung automatisierter Fahrzeuge öffentliche Aufmerksamkeit erlangt. Der Fokus lag in diesen Projekten vor allem auf der funktionalen Entwicklung. Die dabei gezeigten Resultate lassen auf eine absehbare Serienreife von Fahrzeugführungssystemen zur Automatisierung von Fahrzeugen schließen. Der Betrieb von Versuchsträgern wurde jedoch stets durch einen Sicherheitsfahrer abgesichert. So ist es auch im Projekt *Stadtpilot* der Technischen Universität Braunschweig, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstand.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag zur Sicherheit automatisierter Fahrzeuge für den öffentlichen Straßenverkehr geleistet. Im ersten Teil werden die Rahmenbedingungen für automatisierte Fahrzeuge betrachtet und wesentliche Begriffe definiert. Im Fokus steht dabei eine Betrachtung der Automatisierungsgrade für automatisierte Fahrzeuge. Der Stand der Forschung zur Automatisierung von Fahrzeugen schließt diesen Teil.

Im zweiten Teil wird der Entwicklungsprozess nach Norm ISO 26262 betrachtet und auf automatisierte Fahrzeuge angewendet. Hierfür werden die Prozessschritte zur Erstellung einer Item-Definition für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf als Anwendungsfall des automatisierten Fahrens in der Stadt exemplarisch durchgeführt. Da eine vollständige Item-Definition mit einer Betrachtung von allen Szenarien im Rahmen einer Dissertation nicht erstellt werden kann, werden ausgewählte pathologische Szenarien genutzt, um die Anforderungen abzuleiten. Zusätzlich werden Fertigkeitengraphen zur Modellierung von Fahrzeugführungssystemen in die Konzeptphase integriert. Diese ermöglichen eine Modellierung des Systems angelehnt an die Aktivitäten, die ein Mensch bei der Fahrzeugführung ausführt.

Im dritten Teil wird ein funktionales Sicherheitskonzept entwickelt, das den Betrieb von automatisierten Fahrzeugen im städtischen Straßenverkehr ermöglichen soll. Als erster Schritt wird eine Gefährdungsanalyse und Risikobewertung für die pathologischen Szenarien des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf durchgeführt. Als Ergebnis stehen die Sicherheitsziele zur Verfügung, die von dem entwickelten System erreicht werden müssen. Das funktionale Sicherheitskonzept setzt diese Sicherheitsziele durch eine Selbstwahrnehmung und Selbstrepräsentation des automatisierten Fahrzeugs um. Die Selbstrepräsentation wird durch eine Überführung des Fertigkeitengraphen in einen Fähigkeitsgraph erreicht. In diesem werden aggregierte Gütemaße berechnet, die ein Abbild der aktuellen Leistungsfähigkeit des automatisierten Fahrzeugs unter Berücksichtigung der aktuellen Situation ermöglichen. Die Selbstrepräsentation kann anschließend als Eingangsgröße für Fahrentscheidungen genutzt werden. Die Erhaltung eines sicheren Zustands wird durch die funktionale Degradation erreicht und durch Selbstheilung kann sich die Leistungsfähigkeit im Betrieb verbessern.

Abstract

Skill and ability graphs as basis for a safe operation of automated vehicles in public traffic in urban environments

In the past years, many projects researching automated vehicles have gained public attention. The projects focused mainly on the functional development. Shown results suggest a foreseeable introduction of vehicle guidance systems for vehicle automation to the maturity phase. Nevertheless, the operation of experimental vehicles in public traffic was always monitored by a safety driver. So it is in the project Stadtpilot at Technische Universität Braunschweig in which this dissertation arose.

This work contributes to the safety of automated road vehicles for public traffic. The first part covers surrounding conditions for automated vehicles and important terms are defined. Especially automation levels for automated vehicles are focused. The state of research for vehicle automation closes this part.

The second part considers the development process according to the ISO 26262 standard and its applicability to automated vehicles. The development steps to create an Item Definition for a fully automated vehicle on demand as an example of automated driving are applied. A complete Item Definition covering all scenarios is not feasible in a single dissertation. Thus, part two uses selected pathological scenarios to deviate requirements. Additionally, skill graphs to model vehicle guidance systems are integrated into the concept phase. These graphs allow a modeling of systems adapted from the activities performed by humans while driving.

In the third part a functional safety concept is developed. This should enable the operation of automated vehicles in public traffic. As a first step, a hazard identification and risk assessment for the pathological scenarios of the fully automated vehicle on demand is performed. This results in safety goals, which need to be fulfilled by the resulting system. The functional safety concept implements the safety goals by introducing a self-perception and a self-representation for automated vehicles. The self-representation is achieved with a transfer of the skill graph to an ability graph. In the ability graph, aggregated performance metrics are calculated, which create a representation of the current performance capabilities of the automated vehicle in respect to the current driving situation. The resulting self-representation can then be used as an input to the driving decisions. The preservation of a safe operating state is reached by functional degradation. With self-healing, the performance capabilities can be improved.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Thesen, Struktur und Entstehung der Arbeit	1
I Rahmenbedingungen, Definitionen und Terminologie	7
1 Rahmenbedingungen zur Automatisierung von Fahrzeugen	9
1.1 Die Aufgaben des Fahrers im Straßenverkehr	9
1.1.1 Fahrzeugführung	9
1.1.2 Weitere Aufgaben des Fahrers	10
1.1.3 Kriterien zur Bewertung der Systemleistung Fahrer-Fahrzeug	12
1.1.4 Zusammenfassung	14
1.2 Elektronische Fahrzeugsysteme und Fahrerassistenzsysteme	14
1.2.1 Auswahl einiger Meilensteine	14
1.2.2 Definition von Fahrerassistenzsystemen	15
1.2.3 Ausgewählte Fahrerassistenzsysteme	17
1.2.4 Wirkung von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit . . .	19
1.2.5 Rolle des Fahrers bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen . . .	21
1.2.6 Zusammenfassung	23
1.3 Fahrzeugführungssysteme	23
1.3.1 Definition von Fahrzeugführungssystemen	23
1.3.2 Die Begriffe Automatisierung und Autonomie	24
1.3.3 Automatisierungsgrade von Fahrzeugen	28
1.3.4 Rolle des Menschen	36
1.3.5 Entscheidungsbaum zur Klassifikation	38
1.3.6 Potential der Automatisierung von Fahrzeugen	39
1.3.7 Rechtliche Situation für automatisierte Fahrzeuge	40
1.3.8 Zusammenfassung	44
1.4 Anwendungsfälle für automatisierte Fahrzeuge	44
1.4.1 Das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	44

1.4.2	Das Projekt Stadtpilot	47
2	Terminologie für die vorliegende Arbeit	51
2.1	Sicherheit, Risiko und verbundene Begriffe	51
2.2	Szenario, Szene, Situation und verbundene Begriffe	56
2.3	Fahrmanöver, Fertigkeit und Fähigkeit	63
2.3.1	Fahrmanöver	63
2.3.2	Fertigkeiten und Fähigkeiten	64
3	Auswahl von Forschung und Technik zur funktionalen Entwicklung und zur Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen	69
3.1	Robotik	69
3.2	Bahnen und Schienenfahrzeuge	72
3.3	Luft- und Raumfahrt	73
3.4	Kraftwerke	74
3.5	Elektronische Fahrzeugsysteme	75
3.5.1	Fahrerassistenzsysteme	75
3.5.2	By-wire-Systeme	79
3.5.3	Fahrzeugführungssysteme	80
3.6	Fazit	87
II	Beitrag zum Entwicklungsprozess für das voll- ständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	91
4	Entwicklung von elektronischen Fahrzeugsystemen nach Norm ISO 26262	95
4.1	Entwicklungsprozess nach Norm ISO 26262	95
4.2	Kritik zur Konzeptphase des Entwicklungsprozesses nach Norm ISO 26262	98
5	Vorschlag zur Erweiterung des Entwicklungsprozesses zur Erstellung der Item-Definition	101
6	Anwendung des Entwicklungsprozesses zur Ableitung der Anforde- rungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	107
6.1	Beschreibung der Einsatzumgebung und Ableitung von Szenarien	107
6.1.1	Einsatzbereich	107
6.1.2	Pathologische Szenarien im städtischen Straßenverkehr	113
6.1.3	Zusammenfassung	119
6.2	Ableitung von allgemeinen Verhaltensregeln	122
6.3	Ableitung von sicheren Zuständen in ausgewählten Szenarien	123

6.3.1	Sicherer Zustand für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	123
6.3.2	Bedeutung der Geschwindigkeit für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	127
6.3.3	Zusammenfassung	129
6.4	Erforderliche Fahrmanöver	134
6.5	Fertigkeitengraph zur Modellierung des Fahrzeugführungssystems des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf	141
6.5.1	Vorarbeiten	142
6.5.2	Struktur des Fertigkeitengraphen	144
6.5.3	Erstellung des Fertigkeitengraphen	146
6.5.4	Zusammenfassung	153
6.6	Funktionale Systemarchitektur zur Umsetzung der Fertigkeiten	153
6.7	Fazit	157
7	Selbstkritik	159
III	Funktionales Sicherheitskonzept für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	161
8	Ziele, Anforderungen und Vorgehen	165
8.1	Ziele des funktionalen Sicherheitskonzepts	165
8.2	Anforderungen an ein funktionales Sicherheitskonzept	166
8.3	Vorgehen zur Erstellung des funktionalen Sicherheitskonzepts	167
9	Vereinfachte Gefährdungsanalyse und Risikobewertung für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	169
9.1	Analyse von Szenarien und Identifikation von Gefährdungen	169
9.2	Klassifikation der Gefährdungen und Festlegung der Automobil-Sicherheitsintegritätslevel (ASIL)	172
9.3	Formulierung der Sicherheitsziele	175
10	Resultierendes funktionales Sicherheitskonzept	177
10.1	Ableitung der Sicherheitsanforderungen	178
10.2	Zuordnung der funktionalen Sicherheitsanforderungen zu Fertigkeiten und funktionalen Komponenten	179
10.3	Überblick über das funktionale Sicherheitskonzept	179
10.4	Selbstwahrnehmung	181

10.5 Selbstrepräsentation mittels Fähigkeitengraph	184
10.5.1 Fähigkeitsknoten	185
10.5.2 Kanten im Fähigkeitengraph	185
10.5.3 Aggregierte Gütemaße als Fähigkeitenlevel	187
10.5.4 Zusammenfassung	188
10.6 Nutzung der Selbstrepräsentation zur Realisierung sicheren Verhaltens mittels Funktionaler Degradation	189
10.6.1 Funktionale Degradation	189
10.6.2 Beispielhafte Anwendung auf das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf	191
10.6.3 Erhöhung der Leistungsfähigkeit mittels Selbstheilung	193
10.7 Fazit	194
11 Zusammenfassung und Ausblick	195
Eigene Veröffentlichungen	199
Literaturverzeichnis	203

Thesen, Struktur und Entstehung der Arbeit

Das Automobil hat sich seit dessen Erfindung im 19. Jahrhundert von einem mechanischen und hydraulischen System mit wenigen Komponenten zu einem mechatronischen und elektrohydraulischen System mit zahlreichen Komponenten gewandelt. Eine besondere Entwicklung hat sich seit der Einführung von elektronischen Systemen über Fahrerassistenzsysteme¹ bis hin zu aktuell diskutierten Fahrzeugführungssystemen² für Kraftfahrzeuge³ vollzogen. Der Fahrer⁴ wird heutzutage bei der Fahrzeugführung durch diese elektronischen Systeme unterstützt und entlastet. Zukünftige Systeme sollen dem Fahrer einige oder alle seiner Aufgaben bei der Teilnahme im Straßenverkehr abnehmen.

Diese *Automatisierung von Kraftfahrzeugen* bietet neue Möglichkeiten für die Sicherheit im Straßenverkehr⁵, den Komfort, die Mobilität und die Effizienz bei der Erfüllung von Transportaufgaben (*Kapitel 1.1*). Einhergehend mit dieser Entwicklung ist eine Steigerung der Komplexität⁶ im Sinne der Anzahl der in die Systeme integrierten und vernetzten Hardware- und Softwarekomponenten. Dadurch ergibt sich eine neue Situation für das Zusammenspiel zwischen Fahrer und Fahrzeug. Wenn der Anteil des Fahrers an den Fahraufgaben verringert wird oder vollständig entfällt, übernimmt ein technisches System dessen Aufgaben. Das Fahrzeug wird *automatisiert* (*Kapitel 1.3*). Der Anteil des technischen Systems an den Fahraufgaben wird in *Automatisierungsgraden* für Fahrzeuge klassifiziert (*Kapitel 1.3.3*).

Beim Einsatz von Fahrerassistenzsystemen ist der Fahrer bisher verpflichtet, stets auf den Verkehr zu achten und die Fahrzeugführung vollständig zu übernehmen, falls das technische System, beispielsweise aufgrund von ungünstigen Umweltbedingungen oder einem technischen Fehler, nur eingeschränkt oder nicht mehr funktionsfähig ist. Die bisher notwendige dauerhafte menschliche Überwachung des technischen Systems reduziert die Anforderungen an das technische System und macht diese Systeme erst möglich. Jedoch verhindert diese notwendige Überwachung den Fahrern, sich während der Fahrt anderen Aktivitäten zu widmen, beziehungsweise ein Fahrzeug ohne Menschen an Bord am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen zu lassen.

¹Ein Fahrerassistenzsystem unterstützt bei der Fahrzeugführung, übernimmt diese jedoch nicht vollständig (*Kapitel 1.2*).

²Ein Fahrzeugführungssystem übernimmt die Fahrzeugführung vollständig (*Kapitel 1.3*).

³Falls nicht explizit angemerkt, stehen die Begriffe *Kraftfahrzeug* und *Fahrzeug* für Kraftfahrzeuge der Klassen Lkw, Bus, Pkw und motorisiertes Zweirad, die für den Straßenverkehr zugelassen sind. Bei Zweirädern unterscheiden sich jedoch beispielsweise die Bedienelemente. Auf diesen Umstand wird nicht explizit eingegangen, da er für die weiteren Ausführungen in der vorliegenden Arbeit keine signifikante Bedeutung hat.

⁴Falls nicht explizit angemerkt steht der Begriff *Fahrer* für menschliche Fahrerinnen und Fahrer.

⁵Falls nicht explizit angemerkt steht der Begriff *Straßenverkehr* für den öffentlichen Straßenverkehr in Deutschland.

⁶In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Verwendung des vielschichtigen Begriffs *Komplexität* stets mit einem Zusatz, der erklärt, welcher Sachverhalt die Komplexität ausmacht. In diesem speziellen Fall sind es die Anzahl der Komponenten, die in ein System integriert sind, und deren Vernetzung untereinander.

These 1

Eine wesentliche Herausforderung bei der Einführung von vollständig automatisierten Fahrzeugen ist die vollständige, sichere Übernahme der Aufgaben des Fahrers durch ein elektronisches System, das nicht dauerhaft von einem Menschen überwacht werden muss.

Die funktionalen Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug hängen von dessen Einsatzumgebung und dessen Funktionsumfang ab (*Kapitel 1.4.1*). In der vorliegenden Arbeit wird das von Wachenfeld u. a. (2015) definierte *Autonome Fahrzeug auf Abruf* als Beispiel für einen Anwendungsfall zum automatisierten Fahren verwendet (*Kapitel 1.4.1*). Dies entspricht dem langfristigen Projektziel des Projekts *Stadtpilot* des Instituts für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig⁷, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstand (*Kapitel 1.4.2*). Im Projekt *Stadtpilot* wird der Versuchsträger *Leonie* im öffentlichen Straßenverkehr unter realen Verkehrsbedingungen⁸ betrieben (Wille u. a., 2010; Nothdurft u. a., 2011).

Wesentliche Beiträge der vorliegenden Arbeit sind ein Vorschlag zur Erweiterung des Entwicklungsprozesses von automatisierten Fahrzeugen und ein funktionales Sicherheitskonzept für vollständig automatisierte Fahrzeuge.

Entwicklungsprozess

Für den sicheren Betrieb eines Fahrzeugführungssystems muss dieses nach dem Stand der Technik konzeptioniert, entwickelt und getestet werden, bevor eine Freigabe für den Straßenverkehr erfolgen darf. Beim Entwicklungsprozess wird auf die für elektronische Fahrzeugsysteme geltende Norm ISO⁹ 26262 (ISO 26262, 2011) aufgebaut, da diese Norm den Stand der Technik für die funktional sichere Entwicklung von elektronischen Fahrzeugsystemen abbildet. In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendbarkeit der Norm auf Fahrzeugführungssysteme untersucht (*Kapitel 4.2*).

Nicht nur bei fertigen Produkten, sondern auch während der Entwicklung und dem Test muss die Sicherheit beim Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs höchste Priorität haben. Obwohl sich die erforderlichen Technologien automatisierter Fahrzeuge noch in der Entwicklung befinden, kann ein Unfall die gesamte Forschung beeinträchtigen. Die gesellschaftliche Akzeptanz würde durch einen Unfall, selbst eines in der Entwicklung befindlichen Systems, wahrscheinlich stark verringert werden¹⁰. Dies zeigen das Medienecho nach einem Auffahrunfall eines automatisierten Toyota Prius der Google Inc., obwohl dieser nach Angabe der Google Inc. manuell betrieben wurde¹¹, und das Medienecho nach dem ersten Unfall im automatisierten Betrieb¹². Auch ein Unfall eines teilautomatisierten Tesla

⁷Homepage des Projekts Stadtpilot: <http://stadtpilot.tu-bs.de/>, abgerufen am 23.03.2016

⁸Pressemeldung Nr. 133/2010 vom 08. Oktober 2010 der Technischen Universität Braunschweig (<https://www.tu-braunschweig.de/presse/medien/presseinformationen?year=2010&pinr=133>, abgerufen am 23.03.2016)

⁹ISO steht für International Standardization Organization (Deutsche Übersetzung: Internationale Organisation für Normung)

¹⁰Pressemeldung von USNews vom 08. Mai 2013 (<http://www.usnews.com/news/articles/2013/05/08/experts-accident-would-shut-down-googles-driverless-car-experiment>, abgerufen am 23.03.2016)

¹¹Pressemeldung von caradvice.com.au vom 08. August 2011 (<http://www.caradvice.com.au/131519/google-self-driving-toyota-prius-causes-minor-car-crash/>, abgerufen am 23.03.2016)

¹²Pressemeldung der Nachrichtenagentur Reuters vom 29. Februar 2016 (<http://www.reuters.com/article/google-selfdrivingcar-idUSL2N1681DP>, abgerufen am 23.03.2016). Zahlreiche weitere Medien haben über den Vorfall berichtet.

Model S hat für Aufsehen gesorgt, da bei diesem Unfall ein Mensch zu Tode gekommen ist¹³¹⁴.

Wie von Ohl (2014, Kapitel 2.1) beschrieben, sind bisher alle Forschungs- und Erprobungsfahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr durch einen Sicherheitsfahrer abgesichert und somit nicht vollständig automatisiert (*Kapitel 1.3.3*). Das Risiko des öffentlichen Tests von Fahrzeugen, die nicht dauerhaft durch einen Sicherheitsfahrer überwacht werden müssen, scheint für die forschenden Einrichtungen und Unternehmen nicht tolerierbar zu sein. Wie hoch das Risiko beim Test und späteren Betrieb von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr sein darf, ist bisher noch nicht erforscht. Erste Schritte zur Anregung einer öffentlichen Diskussion wurden beispielsweise im Projekt *Autonomes Fahren* des Kollegs *Villa Ladenburg* der Daimler und Benz Stiftung unternommen. Die Ergebnisse dieses Projekts sind in Maurer u. a. (2015) veröffentlicht.

Ein mögliches Ergebnis der Analyse des aktuellen Standes der Technik kann daher sein, dass eine Entwicklung und ein Einsatz von automatisierten Fahrzeugen ohne eine dauerhafte Überwachung des Systems durch einen Menschen mit den heutzutage verfügbaren Technologien nicht ausreichend sicher gestaltet werden kann.

These 2

Bereits bei der Entwicklung eines automatisierten Fahrzeugs muss die Sicherheit an oberster Stelle stehen, um die Wahrscheinlichkeit von Unfällen während der Entwicklung und im späteren Betrieb des entwickelten Systems so gering, wie es der Stand der Technik erlaubt und wie es von der Gesellschaft akzeptiert wird, zu halten. Dies schließt die Sicherheit bei Test- und Freigabeprozessen mit ein.

Funktionales Sicherheitskonzept

Das funktionale Sicherheitskonzept enthält einen Lösungsansatz für den Einsatz eines vollständig automatisierten Fahrzeugs in komplexen Situationen (*Kapitel 6.1*) ohne Einbindung des Sicherheitsfahrers. Der Fokus liegt dabei auf einer ganzheitlichen Betrachtung der Sicherheit bei Entwicklung, Test und Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs. Ein solches Sicherheitskonzept für vollständig automatisierte Fahrzeuge ist auf weitere Ausprägungen von weniger stark automatisierten Fahrzeugen und auf Fahrerassistenzsysteme übertragbar, wenn diese Teilfunktionen der Fahraufgaben übernehmen. Die vorliegende Arbeit baut auf früheren Arbeiten in diesem Themengebiet auf. Besonders zu nennen sind hier die Dissertationen von Maurer (2000), Pellkofer (2003), Siedersberger (2003), Hörwick (2011) und Bergmiller (2014).

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Sicherheitskonzept umfasst folgende Kernpunkte:

- Sicheres Verhalten¹⁵ des automatisierten Fahrzeugs im Straßenverkehr und ein Betrieb des automatisierten Fahrzeugs in einem sicheren Zustand

¹³Offizielle Meldung der Tesla Motors, Inc. vom 30. Juni 2016 (https://www.tesla.com/de_DE/blog/tragic-loss, abgerufen am 31.07.2016)

¹⁴Pressemeldung der Nachrichtenagentur Reuters vom 30. Juni 2016 (<http://ca.reuters.com/article/businessNews/idCAKCN0ZG2ZC>, abgerufen am 31.07.2016). Zahlreiche weitere Medien haben über den Vorfall berichtet.

¹⁵Unter *Verhalten* wird hier das nach außen sichtbare Verhalten eines Fahrzeugs im Verkehr verstanden.

- Eine *Selbstwahrnehmung* und eine *Selbstrepräsentation der Leistungsfähigkeit* des automatisierten Fahrzeugs im Betrieb
- In das Fahrzeugführungssystem integrierte Mechanismen der *funktionalen Degradation* und der *Selbstheilung*

Sicheres Verhalten im Straßenverkehr

Zur funktionalen Beschreibung verschiedener Fahrerassistenzsysteme gibt es internationale Standards, wie zum Beispiel die Normen ISO 22178 und ISO 22179 für den Abstandsregeltempomat (im Englischen *Adaptive Cruise Control* (ACC)) mit verschiedenen Zusatzfunktionen, wie zum Beispiel ACC über den vollen Geschwindigkeitsbereich (vom Stillstand bis zur maximalen Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs) und ACC mit Stop & Go Funktion (ISO 15622, 2010; ISO 22179, 2009; ISO 22178, 2009), die Norm ISO 22839 für Systeme zur Minderung von Unfallfolgen bei Frontkollisionen (ISO 22839, 2013) und die Norm ISO 11270 für Systeme zur Unterstützung beim Halten eines Fahrstreifens (ISO 11270, 2014). Für automatisierte Fahrzeuge verschiedener Automatisierungsgrade existieren bisher keine internationalen Standards, die eine funktionale Beschreibung der Fahrzeugführungssysteme enthalten.

Das Verhalten von automatisierten Fahrzeugen im Straßenverkehr muss im Normalbetrieb, im Fehlerfall und in Gefährdungssituationen sicher sein (*Kapitel 10*). Der Straßenverkehr birgt ein inhärentes Risiko, welches durch automatisierte Fahrzeuge aufgrund der offenen Menge an möglichen Situationen nicht vollständig beseitigt werden kann. Unfälle mit automatisierten Fahrzeugen können nicht ausgeschlossen werden. Passive Sicherheitsmaßnahmen zielen daher auf eine Reduzierung von Unfallfolgen für Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer ab. Die passive Sicherheit bei automatisierten Fahrzeugen hat keine abweichenden Anforderungen zu manuell betriebenen Fahrzeugen. Daher werden passive Sicherheitsmaßnahmen in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Sicherer Zustand

Zur Generierung sicheren Verhaltens muss sich das automatisierte Fahrzeug in einem sicheren Betriebszustand befinden. Dieser ist erreicht, wenn sich das Risiko für Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer gemäß Norm ISO 26262 (2011, Teil 1) unter einer zumutbaren Schwelle bewegt (*Kapitel 6.3*).

These 3

Ein automatisiertes Fahrzeug nimmt sicher am Straßenverkehr teil, wenn das Betriebsrisiko dauerhaft unterhalb einer zumutbaren Schwelle für Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer liegt.

Selbstwahrnehmung und Selbstrepräsentation

Das sichere Verhalten des Fahrzeugs, der Betrieb in einem sicheren Zustand und die strukturierte Entwicklung eines automatisierten Fahrzeugs sind wichtige Bausteine auf dem Weg zur Einführung von automatisierten Fahrzeugen in den öffentlichen Straßenverkehr. Im Betrieb dieser Fahrzeuge darf das Verhalten der Fahrzeuge nicht zu einer Gefährdung von Insassen und weiteren Verkehrsteilnehmern führen. Das Verhalten muss daher sicher geplant werden und Fahrentscheidungen müssen sicher ausgeführt werden. Hierzu ist es

notwendig, dass das Fahrzeugführungssystem die eigene Leistungsfähigkeit kennt und diese bei der Entscheidungsfindung und -ausführung berücksichtigt (Maurer, 2000, Kapitel 6.2). Aus diesem Grund fließen Daten der Selbstwahrnehmung in die Selbstrepräsentation ein (*Kapitel 10.5*). Unter Selbstwahrnehmung wird die Erfassung und Interpretation von Messwerten durch die Sensorik eines Systems verstanden. Dazu zählen sowohl Sensoren, die die Umwelt erfassen, als auch Sensoren, die das System selbst überwachen. Außerdem wird das Verhalten des Fahrzeugs durch sich selbst überwacht, zum Beispiel die Ausführung von Fahrmanövern. Die gesammelten Daten werden zur Selbstrepräsentation genutzt. Zum einen werden hier mathematische Modelle des Systems mit Daten gefüllt, zum anderen wird die aktuelle Leistungsfähigkeit des Systems ermittelt (Knoll und Christaller, 2000). Auf Basis der Selbstwahrnehmung und der Selbstrepräsentation erhalten die funktionalen Komponenten des Fahrzeugführungssystems Informationen, die zu einer sicheren Ausführung dieser notwendig sind.

These 4

Ein automatisiertes Fahrzeug benötigt eine Selbstwahrnehmung und eine Selbstrepräsentation, die eine vollständige Überwachung und Auswertung aller systemrelevanten Parameter ermöglichen und dadurch die aktuelle Leistungsfähigkeit ermitteln.

Funktionale Degradation und Selbstheilung

Funktionale Degradation wird eingesetzt, um den Funktionsumfang des automatisierten Fahrzeugs der eigenen Leistungsfähigkeit und den Anforderungen der aktuellen Situation anzupassen (*Kapitel 10.6*). Funktionale Degradation basierend auf der Selbstrepräsentation ermöglicht dem Fahrzeugführungssystem Maßnahmen zu ergreifen, um das aktuelle Betriebsrisiko so zu reduzieren, dass es stets in einem zumutbaren Bereich liegt. Aktionen zur Anpassung der Leistungsfähigkeit werden ausgeführt, um eine Gefährdung durch das automatisierte Fahrzeug für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer zu verhindern. Methoden zur Selbstheilung werden genutzt, um die Leistungsfähigkeit des Systems nach einer funktionalen Degradation wieder zu erhöhen (*Kapitel 10.6.3*).

These 5

Fehlerfreiheit eines Fahrzeugführungssystems kann aufgrund dessen Komplexität im Sinne der zahlreichen vernetzten Hardware- und Softwarekomponenten nicht garantiert werden. Daher sind Mechanismen wie funktionale Degradation und Selbstheilung für einen sicheren Betrieb notwendig.

Menschen machen bei der Fahrzeugführung Fehler, denn andernfalls gäbe es nur sehr wenige Unfälle. Dadurch gilt auch für den Menschen, dass Fehlerfreiheit nicht erreicht werden kann. Es stellt sich die Frage nach einem Maß, wie sicher der Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs sein muss. Diese Fragestellung kann in der vorliegenden Arbeit nicht beantwortet werden, da es sich dabei um eine vielschichtige gesellschaftliche Fragestellung handelt.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte funktionale Sicherheitskonzept ist auf Stadtgebiete, Landstraßen und Autobahnen anwendbar. Der Fokus liegt jedoch auf der städtischen Umgebung und auf Pkw. Im Projekt Stadtpilot wurden Teile des Sicherheitskonzepts für den Versuchsträger *Leonie*, einem Volkswagen Passat B7, umgesetzt (*Kapitel 1.4.2*). Der Einsatz in anderen Pkw-Typen, aber auch in Lkw, Bussen und weiteren Fahrzeugtypen ist ebenso vorstellbar, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht explizit untersucht. Da

ein Fahrzeugführungssystem den Steuerungssystemen in der Robotik ähnelt, erscheint ein Einsatz in mobilen Robotern ebenfalls möglich.

Entstehung der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Projekts Stadtpilot entstanden. Das ursprüngliche Ziel war die Entwicklung eines funktionalen Sicherheitskonzepts für den sicheren Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs für den Braunschweiger Stadtverkehr. Zu Beginn der Arbeit im Jahr 2009 gab es nur sehr wenig Literatur zum Thema Sicherheit für automatisierte Fahrzeuge, wodurch es nicht möglich war, auf einen umfassenden Stand der Forschung aufzubauen. Daher wurde versucht über den Betrieb eines Versuchsträgers im Stadtverkehr mit Sicherheitsfahrer ein Sicherheitskonzept zu entwickeln und zu evaluieren. Hierbei stellten sich zahlreiche Forschungsfragen, von denen einige in der vorliegenden Arbeit adressiert werden.

Da sich die notwendigen Technologien und somit auch der Versuchsträger nicht so entwickelt haben, wie es für eine Evaluation eines Sicherheitskonzepts erforderlich gewesen wäre, konnte dieses Ziel nicht erreicht werden. Der heutige Stand der Forschung zeigt, dass dies bisher niemandem gelang.

Aus dieser Entwicklung resultiert die Struktur der vorliegenden Arbeit. In *Teil I* sind die Grundlagen enthalten, in *Teil II* wird der Entwicklungsprozess betrachtet und exemplarisch in der Theorie durchgeführt und in *Teil III* wird ein Sicherheitskonzept als Gedankenexperiment erstellt. In *Teil II* werden die einzelnen Schritte für die Konzeptphase der Entwicklung basierend auf Expertenwissen durchgeführt. Für jeden dieser Schritte müssen die bestehenden Methoden analysiert und möglicherweise erweitert werden. Dies erfolgt in der vorliegenden Arbeit nicht. Eine Evaluation des Sicherheitskonzepts aus *Teil III* in einem Versuchsträger wird nicht durchgeführt, da der notwendige Funktionsumfang des Versuchsträgers im Projekt Stadtpilot und die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen nicht erreicht werden konnten. Während der Erstellung der Arbeit wurde deutlich, dass dies bisher im Rahmen der universitären Forschung ohne Zugriff auf die größeren Ressourcen der Industrie nicht möglich ist.

Selbstkritik

In der vorliegenden Arbeit werden Begriffe, Konzepte und Lösungsvorschläge zur Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen präsentiert. Aufgrund der Komplexität des Straßenverkehrs hinsichtlich des vielfältigen Umfelds und der unterschiedlichen Verkehrsteilnehmer und der Komplexität der Technologie von Fahrzeugführungssystemen hinsichtlich der Anzahl von Sensoren, Aktoren, Steuergeräten und Algorithmen kann die vorliegende Arbeit keine vollständigen Lösungen für die anstehenden Herausforderungen bei der Einführung automatisierter Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr bieten. Es werden daher speziell Herausforderungen des sicheren Betriebs diskutiert und Lösungsvorschläge für diese präsentiert. Eine vollständige Implementierung und eine darauf aufbauende vollständige Evaluierung der Lösungsvorschläge ist eine Aufgabe für die zukünftige Forschung zur Sicherheit automatisierter Straßenfahrzeuge.

Teil I
Rahmenbedingungen, Definitionen
und Terminologie

1 Rahmenbedingungen zur Automatisierung von Fahrzeugen

1.1 Die Aufgaben des Fahrers im Straßenverkehr

In der heutigen Forschung zur Automatisierung von Fahrzeugen steht die eigentliche Fahrzeugführung im Fokus, da in den ersten Generationen von automatisierten Fahrzeugen stets ein Mensch an Bord sein wird, der das Fahrzeug auch ohne Unterstützung führen kann (Bartels, 2012; Bartels u. a., 2015). Der Fahrer kann somit auch die Überwachung des technischen Zustands des Fahrzeugs übernehmen, die Beladung überwachen und sich um Bedürfnisse weiterer Insassen des Fahrzeugs kümmern. Diese weiteren Tätigkeiten, die nicht direkt mit der Fahrzeugführung zu tun haben, stehen bisher nicht im Fokus der Forschung (FTM, 2004–2014; IV, 2006–2015; ITSC, 2006–2015). In diesem Kapitel sollen daher alle Aufgaben, die ein Fahrer in heutigen Fahrzeugen übernimmt und übernehmen kann, zusammengetragen werden, da diese bei einem fahrerlosen Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs von einem technischen System übernommen werden sollen, soweit dies technisch möglich ist. Weiterhin werden die vier Kriterien Sicherheit, Mobilität, Komfort und Effizienz zur Bewertung der Leistung der Fahraufgabe erläutert. Dadurch wird der Einfluss abgeleitet, den eine Aufgabe des Fahrers jeweils auf die Kriterien hat. Dies soll zeigen, welche Aufgaben auch von einem automatisierten Fahrzeug übernommen werden müssen.

1.1.1 Fahrzeugführung

Die Fahrzeugführung eines Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr ist die wesentliche Aufgabe des Fahrers und setzt sich nach Geiser (1985) aus primären, sekundären und tertiären Tätigkeiten zusammen. Die primären Tätigkeiten decken sich mit den von Donges (1982) gewählten Ebenen *Navigation*, *Führung* und *Stabilisierung* in der von ihm erdachten Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahrzeugführung. Die sekundären Tätigkeiten ergänzen die primären Tätigkeiten situativ, beispielsweise durch das Einschalten der Beleuchtung oder die Verwendung des Fahrtrichtungsanzeigers des Fahrzeugs. Die tertiären Aufgaben umfassen Tätigkeiten, die nicht direkt der Fahrzeugführung dienen, wie beispielsweise die Bedienung von Infotainment- und Klimasystemen (Geiser, 1985; Bubb, 2015a; Timpe, 2001). Die tertiären Tätigkeiten werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Zur Ausführung aller Tätigkeiten laufen beim Fahrer die Prozesse Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung ab (Bubb u. a., 2015). Im Kontext der Fahrzeugführung wurden diese beispielsweise von Bubb (2015b), Abendroth und Bruder (2015) und Timpe (2001) untersucht. Ein Modell für eine allgemeine Beschreibung der kognitiven Prozesse beim Menschen liefert beispielsweise Rasmussen (1983). Die Funktionsweise der kognitiven Prozesse beim Menschen werden in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht, da die Aufgaben, die ein Fahrer übernimmt, und die von ihm ausgeführten Tätigkeiten im Fokus stehen und nicht die Art und Weise, wie der Mensch diese ausführt.

Die Fahrzeugführung besteht aus den drei Aktivitäten Wahrnehmung des Umfelds, Planung von Fahrentscheidungen und Bedienung der Aktorik, da diese Aktivitäten für die primären

Tätigkeiten Navigation, Führung und Stabilisierung, sowie die sekundären Tätigkeiten erforderlich sind (Bubb, 2015a; Geiser, 1985; Donges, 1978). Alle drei Aktivitäten führt der Fahrer parallel und weitestgehend permanent aus.

Wahrnehmung des Umfelds

Die Wahrnehmung des Umfelds zur Fahrzeugführung muss kontinuierlich erfolgen (Bubb u. a., 2015; Abendroth und Bruder, 2015). Sie umfasst die Wahrnehmung der aktuell unbewegten (statischen) und aktuell bewegten (dynamischen) Elemente des Straßenverkehrs¹. Diese werden vom Fahrer primär optisch, unter anderem aber auch akustisch und olfaktorisch, wahrgenommen (Bubb u. a., 2015). Neben der reinen Sinneswahrnehmung gehören auch die Interpretation und die Filterung der Informationen zur Umfeldwahrnehmung. Das wahrgenommene Umfeld bildet zusammen mit den Zielen des Fahrers die Entscheidungsgrundlage für Fahrentscheidungen.

Planung von Fahrentscheidungen

Die Planung der Fahrentscheidungen beinhaltet die Auswahl der zu berücksichtigenden Elemente des Umfelds, die Ermittlung von Handlungsalternativen und die Auswahl einer Handlungsalternative, welche als Fahrentscheidung umgesetzt wird.

Bedienung der Aktorik

Die Aktorik des Fahrzeugs wird mittels Bedienelementen, wie zum Beispiel Gaspedal, Bremspedal, Lenkrad und bei Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe Kupplung und Schalthebel bedient. Zur Bedienung der Aktorik gehören auch die Nutzung des Signalhorns, der Beleuchtungseinrichtungen, der Fahrtrichtungsanzeiger, der Scheibenwischer, Fahrerassistenzsysteme und Einstellungen des Fahrwerks und des Antriebsstrangs, beispielsweise Fahrmodi.

1.1.2 Weitere Aufgaben des Fahrers

Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert mehr als nur die eigentliche Fahrzeugführung, da sich der Zustand des Kraftfahrzeugs und der Zustand der Passagiere und der Ladung während der Fahrt ändern können. Die weiteren Aufgaben umfassen daher die Überwachung des Zustands des Fahrzeugs, die Überwachung des Zustands der Ladung und die Unterstützung der Insassen. Die Unterstützung der Insassen schließt eine Beaufsichtigung mit ein. Ferner kann ein Fahrer auch weiteren Verkehrsteilnehmern zur Hilfe kommen, wenn diese Hilfe benötigen. Diese Aufgabe wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet. Die zusätzlichen Aufgaben des Fahrers sind teilweise in § 23 der deutschen Straßenverkehrsordnung festgehalten (BMVI, 2014, I. § 23 (1)). Hier heißt es wörtlich:

„I. Allgemeine Verkehrsregeln

§23 Sonstige Pflichten von Fahrzeugführenden

- (1) Wer ein Fahrzeug führt, ist dafür verantwortlich, dass seine Sicht und das Gehör nicht durch die Besetzung, Tiere, die Ladung, Geräte oder den Zustand des Fahrzeugs beeinträchtigt werden. Wer ein Fahrzeug führt, hat zudem dafür zu sorgen, dass das Fahrzeug, der Zug, das Gespann sowie die Ladung und die Besetzung vorschriftsmäßig sind und dass die Verkehrssicherheit des Fahrzeugs durch die Ladung oder die Besetzung nicht

¹Eine ausführlichere Erläuterung der Elemente des Umfelds folgt in *Kapitel 2.2*.

leidet. Ferner ist dafür zu sorgen, dass die vorgeschriebenen Kennzeichen stets gut lesbar sind. Vorgeschriebene Beleuchtungseinrichtungen müssen an Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern sowie an Fahrrädern auch am Tage vorhanden und betriebsbereit sein, sonst jedoch nur, falls zu erwarten ist, dass sich das Fahrzeug noch im Verkehr befinden wird, wenn Beleuchtung nötig ist (§ 17 Absatz 1).“

(BMVI, 2014, I. §23 (1))

Überwachung des Zustands des Fahrzeugs

Der Fahrer eines Fahrzeugs überwacht das Fahrzeug, indem er einerseits die Warnleuchten der Bordinstrumente, andererseits Geräusche, Gerüche und Vibrationen wahrnimmt. Diese können auf einen sich anbahnenden oder bereits vorhandenen Defekt hinweisen. Heutzutage ist dies noch nicht vollständig durch technische Systeme möglich (Gerdes, 2014).

Dennoch überwachen Fahrerassistenzsysteme und weitere elektronische Systeme im Kraftfahrzeug bereits heute zahlreiche Parameter. Diese werden genutzt, um zum Beispiel Notlauf-Programme im Antriebssystem zu aktivieren oder Fahrerassistenzsysteme abzuschalten. Oftmals bekommt der Fahrer nur die getroffene Entscheidung mitgeteilt und die Gründe, zum Beispiel im System aufgetretene Fehler, können im Fehlerspeicher betroffener Steuergeräte nachgelesen werden. In der Regel wird der Fahrer jedoch nicht mit den Details eines Fehlers konfrontiert und die Onboard-Diagnose wird nur in einer Werkstatt genutzt.

Überwachung der Ladung

Die Ladung kann sich innerhalb und/oder außerhalb des Innenraums, beispielsweise auf einer Ladefläche oder in einem Anhänger, befinden. Der Fahrer muss die Ladung stets überwachen, da sich diese im Lauf der Fahrt bewegen und zu einem Risiko werden kann - besonders bei Verzögerungen in Längsrichtung, die bei starken Bremsmanövern auftreten können, und bei Querbeschleunigungen, die bei Ausweichmanövern auftreten können.

Unterstützung der Insassen

Der Fahrer hat dafür zu sorgen, dass Passagiere entsprechend gesichert sind und er kann diese in Notfällen oder bei individuellen Bedürfnissen unterstützen. Beispielsweise kann sich ein Taxifahrer bei einem medizinischen Notfall eines Passagiers um Erste-Hilfe-Maßnahmen kümmern.

Es resultieren die folgenden sechs Aufgaben des Fahrers:

- Fahrzeugführung - Wahrnehmung des Umfelds
- Fahrzeugführung - Planung von Fahrentscheidungen
- Fahrzeugführung - Bedienung der Aktorik
- Überwachung des Fahrzeugzustands
- Überwachung der Ladung
- Unterstützung der Insassen

1.1.3 Kriterien zur Bewertung der Systemleistung Fahrer-Fahrzeug

Abendroth und Bruder (2015) nennen als Ausgangsgrößen der Systemleistung des Systems Fahrer-Fahrzeug die *Mobilität*, die *Sicherheit* und den *Komfort*. Diese werden auch von Bubb (2015a) als Motivatoren für die Nutzung von Kraftfahrzeugen und die fortschreitende technologische Entwicklung im Automobilbereich genannt. Die Mobilität wird von Bubb (2015a) bezeichnet als:

„Die Erweiterung und Potenzierung der eigenen Beweglichkeit [...]“
(Bubb, 2015a, Seite 2)

Dies schließt auch den Transport von Ladung mit ein. Der Transport von Menschen und Ladung soll sicher und effizient erfolgen und komfortabel für die Insassen des Fahrzeugs sein. Effizienz beim Transport von Menschen und Ladung spielt daher eine wichtige Rolle, besonders im Hinblick auf einen effizienten Einsatz von Ressourcen und der Reduzierung von Emissionen.

Es resultieren die vier Kriterien *Mobilität*, *Sicherheit*, *Komfort* und *Effizienz* zur Charakterisierung der Nutzung von Kraftfahrzeugen zum Transport von Menschen und Ladung.

Mobilität

Unter Mobilität im Hinblick auf die Nutzung von Kraftfahrzeugen wird eine Erweiterung des Aktionsradius des Menschen verstanden. Mobilität umfasst die Fähigkeit, möglichst viele Orte zu erreichen und Transporte von Menschen und Ladung durchzuführen. Besonders zur Überbrückung großer Entfernungen und zum Transport von schweren Lasten sind Kraftfahrzeuge ein Mittel zur Erhöhung der Mobilität. Auch die Erhaltung des Aktionsradius mit fortschreitendem Alter ist ein Aspekt der Mobilität (Abendroth und Bruder, 2015; Bubb, 2015a).

Sicherheit

Unter Sicherheit² wird das größtmögliche Freisein von Gefährdungen verstanden (Duden: Sicherheit, 2016; DWDS: Sicherheit, 2016; ISO Guide 51, 2014; DIN EN 61508, 2002). Dies schließt das größtmögliche Freisein von Gefährdungen von Insassen und Verkehrsteilnehmern ein, die mit einem Kraftfahrzeug in Wechselwirkung stehen. Im Straßenverkehr besteht eine Gefährdung, falls ein Verkehrsunfall, und somit eine Gefahr für Leib und Leben, droht.

Komfort

Der Komfort setzt sich aus dem Fahrkomfort und weiteren Komforteigenschaften zusammen. Der Fahrkomfort hängt von den erlebten Beschleunigungen der Insassen eines Fahrzeugs ab (Bubb u. a., 2015; Heißing u. a., 2013). Diese entstehen zum einen durch die Fahrweise, zum anderen durch Schläge und Stöße resultierend aus der Fahrbahnbeschaffenheit und den Eigenschaften des Fahrwerks und der Sitze des Fahrzeugs. Zusätzlich mindern Vibrationen und Geräusche während der Fahrt und im Stand den Fahrkomfort (Heißing u. a., 2013). Weitere Komforteigenschaften sind beispielsweise die Klimatisierung des Innenraums und der Schutz vor Sonneneinstrahlung. Infotainmentanwendungen informieren und unterhalten die Insassen und bieten Telekommunikationsmöglichkeiten, wodurch der Aufenthalt im Fahrzeug angenehmer gestaltet werden kann (Meroth u. a., 2008).

²Eine ausführliche Erläuterung dieses Begriffs und weiterer damit verbundener Begriffe folgt in *Kapitel 2.1*.

Bezeichnung	Beschreibung	Relevante Kriterien
Fahrzeugführung Wahrnehmung des Umfelds	Fahrer nimmt Umfeld primär optisch, aber auch akustisch und olfaktorisch, wahr.	Sicherheit, Mobilität, Komfort, Effizienz
Fahrzeugführung Planung von Fahr- entscheidungen	Fahrer plant Handlungsalternativen und wählt eine auszuführende Alternative aus.	Sicherheit, Mobilität, Komfort, Effizienz
Fahrzeugführung Bedienung der Aktorik	Fahrer nutzt Bedienelemente, um das Fahrzeug im Straßenverkehr zu bewegen und dafür notwendige Funktionen zu bedienen.	Sicherheit, Mobilität, Komfort, Effizienz
Überwachung des Fahrzeugs	Fahrer überwacht Kontrollleuchten, hört auf Geräusche und Vibrationen und nimmt Gerüche wahr, die während der Fahrt auftreten und Defekte als Ursache haben können.	Sicherheit
Unterstützung der Insassen	Fahrer unterstützt Passagiere und sorgt dafür, dass diese entsprechend gesichert sind.	Sicherheit
Überwachung der Ladung	Fahrer überwacht Ladung im Innenraum und/oder auf der Ladefläche und/oder im Anhänger und sorgt dafür, dass diese entsprechend gesichert ist.	Sicherheit

Tabelle 1.1: Aufgaben des Fahrers bei der Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr

Effizienz

Das vierte Kriterium, die Effizienz einer Fahrt, wird an den entstehenden Kosten, den Emissionen und der benötigten Zeit für den Transport gemessen. Die Kosten hängen beispielsweise vom Kraftstoffverbrauch ab. Dieser wird von zahlreichen mechanischen und elektronischen Eigenschaften des Fahrzeugs beeinflusst. Zusätzlich hängt die Effizienz einer Fahrt von der gewählten Route und der Verkehrslage ab. Die erzeugten Emissionen sind vor allem Umweltbelastungen durch Abgase und Lärm. Die Menge der erzeugten Abgase und deren Zusammensetzung hängen von der für die Transportaufgabe eingesetzten Kraftstoffmenge und -art ab. Die eingesetzten Ressourcen zur Erfüllung der Transportaufgabe lassen sich in monetäre Werte überführen, beispielsweise Kosten für Kraftstoffe, Wartung, Versicherungsbeiträge, Gebühren, Steuern, Anschaffungskosten des Kraftfahrzeugs und eingesetzte Zeit.

1.1.4 Zusammenfassung

In *Tabelle 1.1* werden die sechs Aufgaben des Fahrers den vier Kriterien zur Bewertung der Transportaufgabe gegenübergestellt. Die Aufgaben der Fahrzeugführung haben einen Einfluss auf alle vier Kriterien der Transportaufgabe. Die Sicherheit für Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer steht an erster Stelle. Die drei überwachenden Aufgaben sind in erster Linie sicherheitsrelevant und spielen für Mobilität, Komfort und Effizienz keine oder eine zu vernachlässigende Rolle.

Im Zuge der Entwicklung von Kraftfahrzeugen wurden die Kraftfahrzeuge immer leistungsfähiger, wodurch höhere Geschwindigkeiten erreicht werden konnten. Der Bedarf an höheren Antriebsleistungen von Kraftfahrzeugen lässt sich über den Komfort und die Effizienz begründen. Je schneller die Transportaufgabe erfüllt werden kann, um so kürzer ist die Fahrzeit, die ein Faktor für die Effizienz (Kostenreduzierung) bei der Nutzung von Kraftfahrzeugen zur Transportaufgabe ist. Für die Nutzung von Kraftfahrzeugen als Freizeitaktivität, beispielsweise bei der Nutzung im Motorsport, ist eine höhere Leistung ebenfalls wünschenswert. Diese Nutzung wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Die Steigerung von Mobilität, Komfort, Sicherheit und Effizienz wird heutzutage in vielen Fällen durch elektronische Systeme erreicht, die zur Unterstützung des Fahrers bei der Fahrzeugführung eingesetzt werden.

1.2 Elektronische Fahrzeugsysteme und Fahrerassistenzsysteme

Zur Einführung in das Thema elektronische Fahrzeugsysteme in diesem Kapitel dient eine kurze Beschreibung ausgewählter Meilensteine bei deren Entwicklung³. Darauf folgt eine Begriffsklärung für den Begriff *Fahrerassistenzsystem*, da dieser häufig unterschiedlich und missverständlich verwendet wird. Eine Auswahl von heute verfügbaren Systemen zeigt den aktuellen Stand der Technik, bevor abschließend deren Wirkung auf die Verkehrssicherheit beschrieben wird. Die Rolle des Menschen wird ebenfalls betrachtet, da der Fahrer einen Teil der Aufgaben zur Fahrzeugführung auch bei der Verwendung von Fahrerassistenzsystemen ausführen muss.

1.2.1 Auswahl einiger Meilensteine

In den Anfängen der Automobilindustrie im 19. Jahrhundert und zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren die meisten Kraftfahrzeuge rein mechanische Systeme, die ohne elektronische Systeme betrieben wurden. Eines der ersten elektrischen Systeme in Kraftfahrzeugen war der elektrische Starter (Coleman, 1903). Dieser ermöglichte eine komfortablere Nutzung des Kraftfahrzeugs, da der Motor nicht mit einer Kurbel gestartet werden musste. Während bei der Nutzung von Kraftfahrzeugen vor allen Dingen die Ermöglichung der Transportaufgabe im Vordergrund stand (Mobilität), kam es vermehrt zu Verkehrsunfällen mit Verletzten und Getöteten. Dies wurde durch die zunehmende Anzahl an Kraftfahrzeugen und die höheren erreichbaren Fahrgeschwindigkeiten aufgrund der höheren Leistungen der Motoren bedingt. Wie unter anderem von Waltz (1950) vorgestellt, erlangte die Sicherheit der Passagiere größere Bedeutung. Zunächst wurden *passive Sicherheitssysteme* zur Reduzierung der Folgen

³Die Auswahl erfolgte nach der persönlichen Meinung des Autors.

eines Unfalls für die Insassen der beteiligten Fahrzeuge und für weitere Verkehrsteilnehmer eingeführt (Reif (2010, Fahrsicherheit im Kraftfahrzeug); Kramer (2006, Kapitel 1)). Zur Erhöhung der Sicherheit wurden beispielsweise versteifte Karosserien, Sicherheitsglas und Knautschzonen konstruiert und verbaut (Daimler, 2009; Barényi, 1963, 1951). Diese passiven Sicherheitssysteme greifen nicht aktiv in die Fahrzeugführung ein und sind daher als Systeme anzusehen, die Unfallfolgen nur mindern können jedoch keine Unfälle verhindern. Auch für die Effizienz und den Komfort sind diese Systeme nur indirekt relevant: Sie wirken sich meist negativ durch eine Erhöhung des Fahrzeuggewichts (Effizienz) oder durch konstruktive Einschränkungen des Innenraums (Komfort) aus.

Ab der Mitte des 20. Jahrhunderts erlangte neben dem Komfort und der Sicherheit die Effizienz der Kraftfahrzeuge eine große Bedeutung, da steigende Ölpreise zu steigenden Betriebskosten für Kraftfahrzeuge führten (Harks, 2004). Neben mechanischen und konstruktiven Maßnahmen wurden verstärkt elektronische Systeme in Kraftfahrzeuge integriert, die nicht nur Starthilfe leisteten, sondern auch während der Fahrzeugführung aktiv waren. Beispielsweise wurde 1958 bei der Produktion des *Chrysler 300-D* zum ersten Mal eine elektronische Benzineinspritzung, die *Bendix Electrojector*, eingesetzt (Edmunds, 2016; Sherman, 2010). Aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit wurden jedoch nur wenige Fahrzeuge mit diesem System verkauft. Es dauerte daraufhin noch einige Jahre, bis die Technologie zuverlässig genug war und im Massenmarkt eingesetzt wurde. Systeme wie zum Beispiel die elektronischen Benzineinspritzungen der Robert Bosch GmbH wurden ab 1967 in Serienfahrzeugen verbaut und führen seitdem, neben zahlreichen weiteren Maßnahmen, wie zum Beispiel Leichtbau und verbesserte Aerodynamik, zu einer kontinuierlichen Steigerung der Effizienz und der Leistung von Kraftfahrzeugen (Robert Bosch GmbH, 2007). Zur weiteren Erhöhung der Kriterien der Transportaufgabe werden seitdem vermehrt elektronische Fahrzeugsysteme eingesetzt.

1.2.2 Definition von Fahrerassistenzsystemen

Fahrerassistenzsysteme sind programmierbare elektrische/elektronische Systeme (ISO 26262, 2011, Teil 1, 1.31). In diesem Kapitel werden Systeme betrachtet, die den Fahrer direkt bei der Ausführung der Fahraufgaben unterstützen und Teile dieser übernehmen können. Bei der Verwendung dieser Fahrerassistenzsysteme übernehmen der Fahrer und ein oder mehrere elektronische Fahrzeugsysteme die Fahrzeugführung gemeinsam.

Nach Maurer (2012) unterscheidet man zwischen *konventionellen Fahrerassistenzsystemen* und *Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung*. Konventionelle Fahrerassistenzsysteme haben keine Sensorik zur direkten Erfassung der Umgebung des Fahrzeugs, während Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung die Umgebung wahrnehmen können (Maurer, 2015c, 2012; Response, 2009; Stiller, 2005). Im Englischen werden Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung *Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)* (Wörtliche Übersetzung: fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme) genannt (Response, 2009). Sie können sowohl einen Schwerpunkt bei der Unterstützung des Komforts haben als auch bei der Erhöhung der Sicherheit. Komfortsysteme können zusätzlich einen Einfluss auf die Sicherheit haben (Malta u. a., 2012; Benmimoun u. a., 2012; Reif, 2010; Stiller, 2005).

Fahrerassistenzsysteme lassen sich nach der Drei-Ebenen-Hierarchie nach Donges (1982) klassifizieren, wie dies von Winner u. a. (2015) im *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* und im *Code of Practice for the Development of ADAS* (Freie Übersetzung: Leitfaden zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung) des Projekts *Response 3*

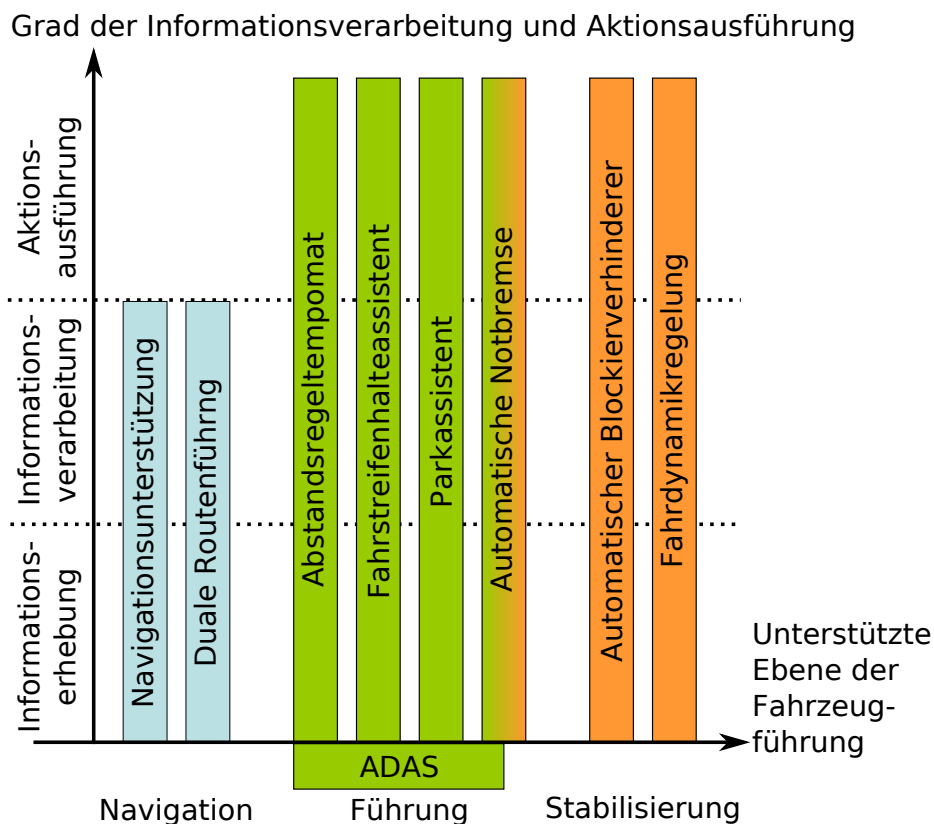


Abbildung 1.1: Beispiele für Fahrerassistenzsysteme kategorisiert nach den Ebenen der Drei-Ebenen-Hierarchie nach Donges (1982); Übersetzt aus Response (2009); Blau hinterlegt sind Systeme auf der Navigationsebene, grün hinterlegt sind Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung auf der Führungsebene und orange hinterlegt sind konventionelle Fahrerassistenzsysteme auf der Stabilisierungsebene; Die Automatische Notbremse unterstützt sowohl auf der Führungsebene als auch auf der Stabilisierungsebene und zählt zu den Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung

angewendet wird (Response, 2009). Die aus Response (2009) entnommene und ins Deutsche übersetzte *Abbildung 1.1* zeigt die Kategorisierung von verschiedenen Fahrerassistenzsystemen auf den Ebenen der Drei-Ebenen-Hierarchie nach Donges (1982). Blaue Balken zeigen Fahrerassistenzsysteme auf der Navigationsebene, grüne Balken zeigen Fahrerassistenzsysteme auf der Führungsebene und orange Balken zeigen Fahrerassistenzsysteme auf der Stabilisierungsebene. Die Automatische Notbremse wird sowohl der Führungsebene als auch der Stabilisierungsebene zugeordnet (Response, 2009). Die Höhe der Balken zeigt an, ob das jeweilige System in der Lage ist, in die Fahrzeugführung einzugreifen.

Neben der Kategorisierung in *Abbildung 1.1* lassen sich einige Fahrerassistenzsysteme den Sicherheitssystemen im Kraftfahrzeug zuordnen. Sicherheitssysteme werden in aktive und passive Sicherheitssysteme unterteilt. Die passiven Sicherheitssysteme werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. *Aktive Sicherheitssysteme* sind Fahrerassistenzsysteme, die aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen (Reif, 2010; Kramer, 2006). Beispielsweise sind der *Automatische Blockierverhinderer* und die *Fahrdynamikregelung* konventionelle Fahrerassistenzsysteme und Sicherheitssysteme auf der Stabilisierungsebene (*Kapitel 1.2.3*) (van Zanten und Kost, 2015; Raste, 2015).

1.2.3 Ausgewählte Fahrerassistenzsysteme

In diesem Kapitel werden die in *Abbildung 1.1* enthaltenen Fahrerassistenzsysteme kurz beschrieben. Eine Kombination dieser Fahrerassistenzsysteme bildet den heutigen Stand der Technik in der Serienproduktion ab.

1.2.3.1 Automatischer Blockierverhinderer

Im Jahr 1978 wurde das erste aktive Sicherheitssystem eingeführt. Das bei Mercedes-Benz *Anti-Blockier-System* genannte System in der Mercedes-Benz S-Klasse der Baureihe 116 regelt die hydraulische Bremsanlage, um ein Blockieren der Räder zu verhindern und so die Kontrollierbarkeit bei starken Bremsungen zu erhalten (Daimler, 2008). Allgemein wird das System *Automatischer Blockierverhinderer* genannt. Durch das Verhindern des Blockierens der Räder des Fahrzeugs beim Bremsvorgang wird die Kontrollierbarkeit eines bremsenden Fahrzeugs erhöht (Raste 2015; Mitschke und Wallentowitz, 2014, Kapitel 9.8). Dieses konventionelle, da nicht mit Umfeldwahrnehmung ausgestattete, Fahrerassistenzsystem ist mittlerweile in nahezu allen Fahrzeugmodellen erhältlich und gehört meist zur Serienausstattung. Es arbeitet auf der Stabilisierungsebene nach Donges (1982) und leistet einen Beitrag zur Sicherheit bei der Fahrt.

1.2.3.2 Fahrdynamikregelung

1995 folgte als weiteres aktives Sicherheitssystem im Mercedes-Benz S-Klasse Coupé der Baureihe 140 die elektronische Fahrdynamikregelung. Bei Mercedes-Benz werden die Fahrdynamikregelung, das *Anti-Blockier-System* (ABS) und die *Antriebsschlupfregelung* (ASR) zusammen *elektronisches Stabilitätsprogramm* (ESP) genannt. Dieses unterstützt den Fahrer, wenn dessen Fahrfähigkeiten nicht mehr ausreichen oder er seine Fahrfähigkeiten überschätzt (Bosch, 2011; Daimler, 2009).

„Die Fahrdynamikregelung (in Kombination mit ABS und ASR ‘Elektronisches Stabilitätsprogramm’ (ESP) genannt) verhindert das seitliche Ausbrechen des Fahrzeugs, indem es durch einseitiges Bremsen ‘gelenkt’ wird.“

(Mitschke und Wallentowitz, 2014, Seite 762)

Die Fahrdynamikregelung ist ein konventionelles Fahrerassistenzsystem und arbeitet wie auch der automatische Blockierverhinderer auf der Stabilisierungsebene nach Donges (1982). Die Einführung beider Systeme führte jeweils zu einer Abnahme der Unfallzahlen sowie der Unfallfolgen - im Falle der Fahrdynamikregelung beispielsweise zu einer Reduzierung der Unfallfolgen mit Verletzten und Getöteten im zweistelligen Prozentbereich (Lie u. a., 2004).

1.2.3.3 Automatische Notbremse

Die *Automatische Notbremse* löst einen Bremsvorgang aus, wenn eine Kollision nicht mehr durch den Fahrer verhindert werden kann. Dadurch kann dieses System Unfallfolgen verringern und Unfälle sogar verhindern (Daimler, 2009; von Holt und Maurer, 2004). Das System ist speziell auf das Verhindern von Kollisionen und die Reduzierung von Unfallfolgen ausgelegt.

Als erstes auf dem deutschen Markt wurde das System nach eigenen Angaben im Jahr 2006 von Mercedes-Benz im CL Coupé der Baureihe 216 als so genannte PRE-SAFE-Bremse eingeführt. Diese kann eine Bremsung auslösen, die das Fahrzeug in den Stillstand bringt (Daimler, 2009). Da hierzu das Umfeld wahrnehmende Sensoren erforderlich sind,

handelt es sich um ein Fahrerassistenzsystem mit maschineller Wahrnehmung und um ein Sicherheitssystem, da es keinen Komfortgewinn, sondern nur einen Sicherheitsgewinn für die Insassen des ausgerüsteten Fahrzeugs mit sich bringt. Die automatische Notbremse arbeitet auf der Führungs- und der Stabilisierungsebene nach Donges (1982). Mittlerweile gibt es mit der Norm ISO 22839 einen internationalen Standard, wie das System zur Schwereminderung von Unfallfolgen bei Frontkollisionen wirken soll (ISO 22839, 2013).

1.2.3.4 Abstandsregeltempomat

Der *Abstandsregeltempomat* (im Deutschen auch *Automatische Distanzregelung*, im Englischen *Adaptive Cruise Control*) regelt die Distanz zu einem vorausfahrenden Fahrzeug (Winner und Schopper, 2015). Immer wieder wird die Frage, wie sich der Abstandsregeltempomat auf die Verkehrssicherheit allgemein und speziell auf die Vermeidung von Frontkollisionen auswirkt, kontrovers diskutiert. In der *euroFOT* Studie (Malta u. a., 2012; Benmimoun u. a., 2012) wurde das Verhalten von Fahrzeugen mit Abstandsregeltempomat im Hinblick auf Sicherheit und Effizienz näher untersucht. Nutzer berichten, dass der Abstandsregeltempomat durch sein maschinelles Eingreifen vor gefährlichen Situationen gewarnt oder direkt Unfälle verhindert hat. Das Ergebnis der Studie zeigt, dass die Sicherheit sowohl für Pkw als auch für Lkw erhöht wird. Zusätzlich führt der Gebrauch des Abstandsregeltempomats bei vielen Nutzern dazu, dass sie im Mittel mit größeren Abständen fahren (Malta u. a., 2012; Benmimoun u. a., 2012). Auch die Auswertung einer größeren Anzahl von Studien zum Abstandsregeltempomat in Kapitel 3.3 der Dissertation von Strasser (2012) kommt zu diesen Ergebnissen.

Bei dem Abstandsregeltempomat handelt es sich um ein Fahrerassistenzsystem mit maschineller Wahrnehmung und es arbeitet auf der Führungsebene nach Donges (1982). Neben dem erwähnten Sicherheitsaspekt leistet das System vor allem einen Beitrag zum Komfort, da es dem Fahrer einen Teil seiner Fahraufgaben abnimmt und ihn dadurch entlastet. Es trägt auch zur Effizienz einer Fahrt bei, da das System ein ruhigeres und gleichmäßigeres Fahren ermöglicht.

1.2.3.5 Fahrstreifenhalteassistent

Der *Fahrstreifenhalteassistent* unterstützt den Fahrer bei der Einhaltung eines durch Fahrstreifenmarkierungen begrenzten Fahrstreifens. Dies erfolgt durch leichte Eingriffe in die Lenkung des Fahrzeugs. Die Lenkeingriffe sollen ein unbeabsichtigtes Verlassen des Fahrstreifens verhindern, beziehungsweise das Fahrzeug gezielt auf die Mitte des Fahrstreifens ausregeln (Gayko, 2012). Bei diesem System handelt es sich um ein Fahrerassistenzsystem mit maschineller Wahrnehmung, dass auf der Führungsebene nach Donges (1982) arbeitet. Das System leistet einen Beitrag zum Fahrkomfort, da der Fahrer entlastet wird. Auch ein Beitrag zur Sicherheit ist vorhanden, da das System den Fahrer vor Verlassen des Fahrstreifens warnen kann, beispielsweise durch eine Vibration des Lenkrads oder durch akustische und optische Signale.

1.2.3.6 Parkassistent

Der Parkassistent ist ein Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer beim Einparken in Parklücken längs oder quer zum Fahrzeug unterstützt. Das System übernimmt die Querführung des Fahrzeugs und gibt Anweisungen in welche Richtung der Fahrer das Fahrzeug in Längsrichtung fahren soll (Katzwinkel u. a., 2015). Dabei handelt es sich um ein System, das den

Komfort erhöht und nur im unteren Geschwindigkeitsbereich aktiv ist. Der Parkassistent arbeitet auf der Führungsebene nach Donges (1982).

1.2.3.7 Navigationssystem

Navigationssysteme ermöglichen es dem Fahrer eine Route von seiner aktuellen Position in der Welt zu einer Zieladresse automatisch zu planen. Sie unterstützen ihn während der Fahrt durch Routenanweisungen (Kleine-Besten u. a., 2015). Das Navigationssystem unterstützt auf der Navigationsebene nach Donges (1982). In *Abbildung 1.1* ist das Navigationssystem in *Navigationsunterstützung* und *Duale Routenführung* unterteilt. Die Navigationsunterstützung erfolgt hierbei im Fahrzeug mittels eines Satellitennavigationssystems und einer digitalen Karte. Unter dualer Routenführung wird die Nutzung von Verkehrsdaten und die zentralisierte Vergabe von Routenempfehlungen an den Verkehrsteilnehmer verstanden (Response, 2009). Es handelt sich bei einem Navigationssystem nicht um ein Sicherheitssystem, sondern primär um ein System zur Erhöhung des Komforts. Auch die Mobilität und Effizienz werden erhöht, da es das Befahren von dem Fahrer unbekannten Straßen erleichtert.

Das Potential zur Erhöhung der Verkehrssicherheit motiviert Ingenieure Fahrerassistenzsysteme weiterzuentwickeln und so einen Beitrag zur Verhinderung von Unfällen zu leisten. Die Wirkung von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit wird daher im folgenden Kapitel näher betrachtet.

1.2.4 Wirkung von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit

Ein häufig genannter Vorteil von Fahrerassistenzsystemen ist deren Wirkung auf die Sicherheit im Straßenverkehr (siehe beispielsweise TUM, 2004-2014). In *Abbildung 1.2* sind Unfallhäufigkeiten, Verletzte und Getötete im Verhältnis zur Jahresfahrleistung in Milliarden Kilometer in Deutschland für den Zeitraum von 1965 bis 2015 dargestellt. Zusätzlich sind die Einführungsjahre verschiedener Sicherheits- und Komfortsysteme eingetragen.

Die Relation zwischen Unfällen, Verletzten und Getöteten im Verhältnis zur Jahresfahrleistung erscheint hier sinnvoll, da andere Metriken wie zum Beispiel Unfälle, Verletzte und Getötete im Verhältnis zur Anzahl der Fahrzeuge oder zur Anzahl der Einwohner eines Bezugsraumes nur indirekt auf die tatsächliche Nutzung von Fahrzeugen eingehen. Bei steigenden Jahresfahrleistungen und gleichzeitig sinkenden Unfallzahlen wird die Effektivität der Sicherheitsmaßnahmen besonders deutlich. Es ist zu beachten, dass sich in dem in *Abbildung 1.2* abgebildeten Zeitraum auch die Rettungsmöglichkeiten und die Straßeninfrastruktur verbessert haben. Außerdem sind die passiven Sicherheitsmaßnahmen, wie zum Beispiel die Karosserien, Lenksäulen und Knautschzonen der Fahrzeuge besser geworden. Schwankungen in der Statistik über die Jahre hinweg können auch durch Wettereinflüsse zustande kommen. Besonders lange und warme Sommer erhöhen beispielsweise die Anzahl der in Unfälle verwickelten Zweiräder (Statistisches Bundesamt, 2015b).

Abbildung 1.2 zeigt, dass die Zahl der Getöteten im Verhältnis zu der Zahl der Verletzten stärker sinkt. Dies deutet auf eine Wirksamkeit der Sicherheitssysteme zur Schwereminderung von Unfallfolgen hin. Die Effekte werden dabei aber erst nach und nach sichtbar, da eine Verbreitung der eingeführten technischen Systeme einige Jahre in Anspruch nimmt.

Die wesentlichen aktiven Sicherheitssysteme in Fahrzeugen im Zeitraum von 1965 bis 2015 sind 1978 die Einführung der Systeme zur automatischen Blockierverhinderung, 1995

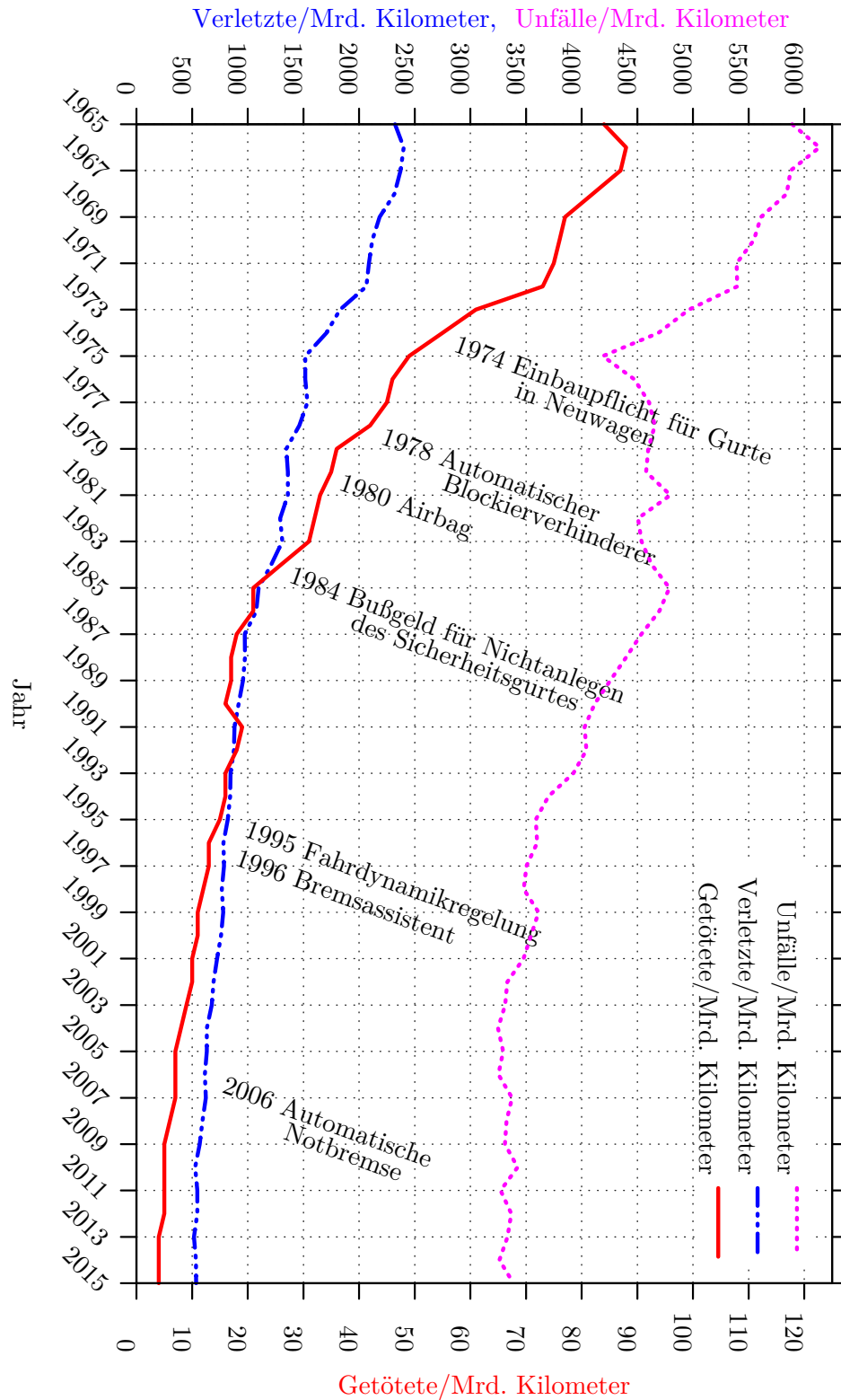


Abbildung 1.2: Unfallstatistik 1965-2015 für Deutschland und Einführungsjahre einer Auswahl von Sicherheitssystemen und zugehörigen Verordnungen (Statistisches Bundesamt, 2016, 2015a,b; Lerner u. a., 2015)

die Fahrdynamikregelung, 1996 der Bremsassistent und 2006 die Automatische Notbremse (Daimler, 2009). Der Sicherheitsgurt als Dreipunktgurt wurde 1959 patentiert und in Fahrzeugen verbaut (Bohlin, 1959). Es dauerte jedoch bis 1974 bis dieser für Neuwagen verpflichtend wurde. 1976 musste dieser, falls vorhanden, verpflichtend angelegt werden und erst 1984 kam es in Deutschland zu einem Bußgeld für das Nichtanlegen des Sicherheitsgurtes (DVR, 2011). Die Effektivität des Sicherheitsgurtes erscheint besonders hoch. Es ist jedoch zu beachten, dass zum 1. Oktober 1972 versuchsweise außerorts, mit Ausnahme von Autobahnen, eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h für Kraftfahrzeuge eingeführt wurde und diese später auch dauerhaft übernommen wurde (Bundesgesetzblatt, 1972). Die Reduzierung der Verletzten und Getöteten ab 1972 ist sicherlich auch darauf zurück zu führen.

Aufgrund der Erhöhung der Verkehrssicherheit ist es nachvollziehbar, dass viele Maßnahmen und einige Fahrerassistenzsysteme zur Pflichtausstattung für neue Pkw- und Lkw-Typen geworden sind. So sind beispielsweise der Bremsassistent seit 2009 für alle neuen Pkw-Typen und die Fahrdynamikregelung seit 2011 für alle neuen Pkw- und Lkw-Typen verpflichtend⁴. 2013 folgte die automatische Notbremse für neue Lkw-Typen. Seit 2014 müssen alle neuen Lkw⁵ mit einer Fahrdynamikregelung ausgerüstet werden (EU EG 631/2009, 2009; EU EG 661/2009, 2009).

2015 starben im Straßenverkehr in Deutschland 3.475 Personen, beziehungsweise etwa 4,7 Personen je Milliarde Fahrkilometer (Statistisches Bundesamt, 2016, 2015a,b; Lerner u. a., 2015). In anderen Ländern liegen diese Zahlen meist höher, so zum Beispiel in den USA wo für die ersten neun Monaten des Jahres 2015 26.000 Getötete geschätzt werden. Für das gesamte Jahr 2015 werden etwa 34.667 Getötete geschätzt. Dies entspricht etwa 6,9 Personen je Milliarde Fahrkilometer (NHTSA, 2016). Trotz der Reduzierung der Getöteten, Verletzten und Verkehrsunfälle durch die Einführung der Fahrerassistenzsysteme als Pflichtausstattung besteht weiter Handlungsbedarf. Zur Erreichung der in Schweden gestarteten und von der Europäischen Union übernommenen “Vision Zero Initiative” (Wörtliche Übersetzung: Initiative “Vision Null”) ist eine weitere Reduzierung der im Straßenverkehr Getöteten erforderlich (VISION ZERO, 2010; EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2011). Die in *Kapitel 1.3* beschriebenen Systeme können einen Beitrag dazu leisten.

1.2.5 Rolle des Fahrers bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen

Ein wesentlicher Aspekt bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen ist die Rolle des Fahrers. Je größer der Anteil der technischen Systeme an der Fahraufgabe ist, umso seltener werden aktive Eingriffe in die Fahrzeugführung durch den Fahrer. Bei einer Kombination von mehreren Fahrerassistenzsystemen ist es bereits mit heutigen Fahrzeugen möglich auf allen Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges (1982) unterstützt zu werden. Das Navigationssystem gibt Routenanweisungen, der Abstandsregeltempomat hält den Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern, der Fahrstreifenhalteassistent regelt das Fahrzeug zur Mitte des Fahrstreifens und die Systeme auf der Stabilisierungsebene unterstützen den Fahrer in kritischen Situationen. Der Fahrer wird dadurch verstärkt zum *Überwacher* für ein oder mehrere technische Systeme.

⁴Dies sind alle Fahrzeuge für die eine Typgenehmigung ab 2009 erstellt wurde.

⁵Dies betrifft alle neu zugelassenen Lkw.

Unter Überwachung wird das dauerhafte Kontrollieren des Betriebs eines Systems verstanden. Ein Überwacher kontrolliert wesentliche Parameter und das Verhalten eines Systems und greift bei Bedarf in den Betrieb des Systems ein. Bei einem Fahrerassistenzsystem hat der Fahrer die Aufgabe, das Umfeld des Fahrzeugs und zusätzlich das Verhalten des Fahrzeugs, beeinflusst durch das Fahrerassistenzsystem, zu überwachen. Bei einer Gefährdung der Insassen des Fahrzeugs oder der weiteren Verkehrsteilnehmer durch das Fahrerassistenzsystem kann der Fahrer das Fahrerassistenzsystem überstimmen oder deaktivieren und das Fahrzeug entsprechend führen. Bei Fahrerassistenzsystemen auf der Stabilisierungsebene ist das Überstimmen nicht möglich. Hier muss ein fehlerhaft arbeitendes System deaktiviert werden.

Nach Bainbridge (1983) ist das Überwachen eine Aufgabe, die ein Mensch nur in begrenztem Umfang übernehmen kann. Bainbridge (1983) hat diesen Sachverhalt als *Ironies of Automation* (Freie Übersetzung: Ironien der Automatisierung) bezeichnet. Ein wesentliches Merkmal bei der Überwachung ist die Zeitdauer, die ein Mensch ein System aufmerksam überwachen kann. Eigentlich soll die Automatisierung den Menschen entlasten, jedoch bekommt er durch die Überwachung eine neue Aufgabe, die er unter Umständen nicht so gut wie die zu automatisierende Aufgabe ausführen kann. Bainbridge (1983) zitiert hier Mackworth (1961), der angibt, dass selbst ein motivierter Mensch eine einfache Überwachungsaufgabe nur für etwa eine halbe Stunde aufmerksam übernehmen kann. Bei einer längeren Fahrt auf einer Autobahn kann es durchaus zu langen aktionsarmen und entsprechend langweiligen Phasen kommen.

Yerkes und Dodson (1908) haben sich mit der Anregung des Menschen und seiner damit zusammenhängenden Leistungsfähigkeit befasst. Sie haben festgestellt, dass es einen idealen Grad der Anforderung an den Menschen gibt, bei dem er die höchste Leistungsfähigkeit erreicht. Dieser ist abhängig von der Tätigkeit und den persönlichen Eigenschaften eines Menschen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie groß der Anteil des Menschen an der Fahrzeugführung sein muss, damit das System aus Fahrer und Fahrzeug möglichst leistungsfähig ist.

Ein weiterer Aspekt bei der steigenden Entlastung des Fahrers ist die Erkennung des Betriebsmodus eines Systems. Ein Überwacher kennt in der Regel nicht jeden Parameter eines Systems, beziehungsweise reduziert seine Aufmerksamkeit auf einige wenige Parameter eines Systems. Auch stehen in Kraftfahrzeugen nur begrenzte Möglichkeiten zur Darstellung von Systemparametern zur Verfügung, beispielsweise durch optische Anzeigen in der Instrumententafel. Es kann daher schwierig für den Überwacher sein, ein Fehlverhalten des Systems zu erkennen (Bainbridge, 1983). Wird bei der Überwachung ein Fehlverhalten des Systems festgestellt, so kann es sein, dass der Überwacher mit einer für ihn unbekannten Situation konfrontiert wird. Zwar könnte der Fahrer sehr gute manuelle Fahrfähigkeiten haben, die Übernahme der Kontrolle vom technischen System könnte jedoch eine andere Art von Fähigkeiten erfordern, die er bisher nicht benötigt hat. Diese weitere Ironie der Automatisierung nach Bainbridge (1983) ist auch ein Grund für die Notwendigkeit, dass der Fahrer bei heutigen Fahrstreifenhaltesystemen beispielsweise dauerhaft oder in Intervallen von wenigen Sekunden ein Lenkmoment aufbringen muss. Dadurch wird der Fahrer angeregt und bleibt in der Lage die Kontrolle zu übernehmen.

Fest steht, dass die Überwachungsleistung des Menschen bei einem höheren Grad der Automatisierung ebenfalls höher sein muss, falls er konzeptbedingt als *Rückfallebene* für

das technische System zur Verfügung stehen muss. Unter Rückfallebene ist eine Möglichkeit zu verstehen, die ein technisches System als ausführende Instanz ablöst. Bei einem Fahrerassistenzsystem ist der Mensch die Rückfallebene. Fällt beispielsweise der Abstandsregeltempomat aus, so kann der Fahrer weiterhin den Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern regeln. Er muss dazu jedoch das System und dessen Verhalten überwachen, da er sonst nicht mitbekommt, dass eine Übernahme notwendig ist. Im folgenden Kapitel wird dieser Aspekt bei der Automatisierung der zu erledigenden Aufgaben bei der Teilnahme am Straßenverkehr betrachtet.

1.2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden ausgewählte Fahrerassistenzsysteme vorgestellt und deren Wirkung auf die Verkehrssicherheit und die resultierende Rolle des Menschen bei der Verwendung der Fahrerassistenzsysteme gegeben. Das Kapitel ist somit die Grundlage für das Verständnis der Herausforderungen bei der Automatisierung des Fahrens und dessen Potential. Die Erhöhung der Verkehrssicherheit (Sicherheit), die Entlastung des Fahrers (Komfort) und die Steigerung der Effizienz bei gleichzeitiger Erhaltung der uneingeschränkten Mobilität mit Straßenfahrzeugen durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen seien besonders hervorgehoben. Bei allen Vorteilen, die diese Systeme mit sich bringen, gibt es die Gefahren einer Unterforderung des Menschen als Überwacher des technischen Systems und einer Überforderung bei der Übernahme der Kontrolle vom technischen System. Diese werden bei einer Erhöhung des Anteils von elektronischen Systemen an den Aufgaben des Fahrers weiter zunehmen. Im folgenden Kapitel werden daher Fahrzeugführungssysteme betrachtet, die den Fahrer vollständig entlasten können und bei denen der Fahrer nicht mehr permanent sondern nur noch bei Bedarf als Überwacher und Rückfallebene eingesetzt werden soll.

1.3 Fahrzeugführungssysteme

Der technische Fortschritt in der Elektrotechnik und der Informationstechnik hat in den letzten Jahren zur Serieneinführung von Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung geführt. Der dadurch entstandene Trend, den Fahrer stärker und besser zu unterstützen, wird durch eine *Automatisierung* von Kraftfahrzeugen fortgesetzt. Mit elektronischen Fahrzeugsystemen wird es möglich, ein Fahrzeug vollständig von einem technischen System führen zu lassen.

In diesem Kapitel wird der Begriff Fahrzeugführungssystem definiert, da es dafür in der Literatur keine Definition gibt. Weiterhin werden die Begriffe Automatisierung und Autonomie untersucht, da beide sehr häufig synonym verwendet werden. Eine Zusammenfassung von Definitionen soll hier zu einem einheitlichen Verständnis beitragen. Ähnlich verhält es sich mit den Automatisierungsgraden von Fahrzeugen, die ebenfalls näher betrachtet werden. Aus den möglichen Automatisierungsgraden werden abschließend Potentiale von automatisierten Fahrzeugen aufgezeigt.

1.3.1 Definition von Fahrzeugführungssystemen

Der Begriff *Fahrzeugführungssystem* wird bisher in Veröffentlichungen nur spärlich verwendet, und eine Definition des Begriffs existiert bisher nicht. Für die vorliegende Arbeit wird der Begriff *Fahrzeugführungssystem* folgendermaßen definiert.

Definition (Fahrzeugführungssystem)

Ein Fahrzeugführungssystem ist ein elektronisches System, welches die Aufgaben Bedienung der Aktorik, Planung von Fahrentscheidungen und Wahrnehmung des Umfelds in einem definierten Anwendungsfall vollständig übernimmt. Die weiteren Aufgaben kann das Fahrzeugführungssystem je nach Automatisierungsgrad ebenfalls übernehmen.

Zu den Fahrzeugführungssystemen gehören alle Systeme, die das Fahrzeug vollständig gemäß der Aufgaben Wahrnehmung des Umfelds, Planung von Fahrentscheidungen und Bedienung der Aktorik in *Tabelle 1.1* im Straßenverkehr führen. Zusätzlich können die weiteren Aufgaben aus *Tabelle 1.1* von einem Fahrzeugführungssystem ausgeführt werden. Ob dies erforderlich ist, hängt vom Automatisierungsgrad des Fahrzeugs ab (*Kapitel 1.3.3*). Ein Fahrzeug, das über ein Fahrzeugführungssystem verfügt, ist in der Lage *automatisiert* am Straßenverkehr teilzunehmen. Man spricht von einem *automatisierten Fahrzeug*. Hier ist ein Unterschied in der Betrachtungsweise des elektronischen Systems festzustellen. Während Fahrerassistenzsysteme in das Fahrzeug integriert werden, beschreibt der Begriff automatisiertes Fahrzeug das gesamte Fahrzeug. Das elektronische System, das in das Fahrzeug integriert ist, wird bisher jedoch nicht explizit benannt. Aus diesem Grund erscheint der Begriff Fahrzeugführungssystem als Bezeichnung für das elektronische Systeme, das die Fahraufgaben ausführt, passend. Weiterhin ist zu beachten, dass nicht das Fahrzeugführungssystem automatisiert ist, sondern das Fahrzeug in das dieses integriert ist, da das Fahrzeug als Gesamtsystem die Transportaufgabe automatisiert erledigt.

1.3.2 Die Begriffe Automatisierung und Autonomie

Der Begriff *Automatisch* ist nach DIN⁶ IEC⁷ 60050-351 folgendermaßen definiert:

„einen Prozess oder eine Einrichtung bezeichnend, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet“

(DIN IEC 60050, 2006, 351-21-40, Seite 18)

Automatisch arbeitende Systeme werden in der vorliegenden Arbeit als *automatisierte Systeme* bezeichnet und lassen sich hinsichtlich ihres *Automatisierungsgrades* klassifizieren. Der Automatisierungsgrad beschreibt nach DIN IEC 60050-351 den

„Anteil der selbsttätigen Funktionen an der Gesamtheit der Funktionen eines Systems oder einer technischen Anlage“

(DIN IEC 60050, 2006, 351-21-41, Seite 18f.).

Unter einem automatisierten System versteht man somit ein technisches Gebilde, das eine festgelegte Aufgabe teilweise oder vollständig ohne menschliche Eingriffe ausführen kann. Bei der Automatisierung von Fahrzeugen werden die in *Tabelle 1.1* genannten Aufgaben vollständig oder teilweise von einem technischen System übernommen. In *Kapitel 1.3.3* werden verschiedene Klassifikationen von Automatisierungsgraden für Straßenfahrzeuge vorgestellt. Diese beschreiben den Anteil der Automatisierung und die beim Menschen verbleibenden Aufgaben.

⁶DIN steht für Deutsches Institut für Normung

⁷IEC steht für International Electrotechnical Commission (Deutsche Übersetzung: Internationale Elektrotechnische Kommission)

Im Zuge der Entwicklung von Fahrzeugführungssystemen wird von *autonomen Fahrzeugen* oder *autonomen Fahrzeugsystemen* gesprochen (siehe beispielsweise FTM (2004–2014); IV (2006–2015); ITSC (2006–2015)). Der Begriff *autonom* stammt vom griechischen *autónomos* ab und bedeutet unter anderem „eigenständig, unabhängig“ (Duden: autonom, 2016). Die ursprüngliche Bedeutung entstammt der Beschreibung von rechtsstaatlichen Instanzen (Gottschalk-Mazouz (2008); Feil (1987, Seite 111f.)). Erst später entwickelten sich weitere Bedeutungen des Begriffs und der Begriff wurde auch zur Beschreibung von technischen Steuerungssystemen verwendet, wie zum Beispiel bei Gottschalk-Mazouz (2008) und Antsaklis u. a. (1989).

Zu beachten ist bereits hier die Unterscheidung des Gesamtsystems *Fahrzeug* und des integrierten *Fahrzeugführungssystems*. Ein automatisiertes Fahrzeug nimmt automatisiert am Straßenverkehr teil. Ein autonomes Fahrzeugführungssystem ist ein Steuerungssystem im Sinne von Gottschalk-Mazouz (2008) und Antsaklis u. a. (1989). Im Folgenden wird diese Differenzierung näher erläutert und ein Vorschlag für eine konsistente Terminologie gegeben.

1.3.2.1 Autonomie von Steuerungssystemen

Gottschalk-Mazouz (2008) nennt acht Verwendungen des Begriffs Autonomie in Bezug auf technische Systeme und fasst diese folgendermaßen zusammen:

„Geht man die einzelnen Definitionsvorschläge durch, lässt sich also zeigen, dass ‘autonom’ hier im Wesentlichen soviel bedeutet wie ‘(energetisch) autark’, ‘mobil’, ‘automatisch’, ‘umweltunabhängig’, ‘adaptiv’, ‘lernend’, ‘innovativ’ oder ‘unvorhersagbar’.“

(Gottschalk-Mazouz, 2008, Seite 4)

Diese Menge an möglichen, nicht aber zwingenden, Eigenschaften führt zu einer gewissen Unschärfe, was genau ein System als autonom kennzeichnet.

Mobil sind Systeme, die sich von selbst in ihrem Umfeld bewegen können (Gottschalk-Mazouz, 2008).

Gottschalk-Mazouz (2008) nennt *Autarkie* in Bezug auf die Energie- oder Materialversorgung als Eigenschaft für ein autonomes System. Ein *energetisch autarkes* System verfügt über eine eigenständige Energieversorgung, beispielsweise durch eine Solarzelle. Autarkie ist jedoch nicht gleichzusetzen mit Autonomie und ein autonomes System muss nicht energetisch oder materiell autark sein, um seine Aufgabe zu erfüllen. Es ist denkbar, dass es eine Schnittstelle zu seiner Umwelt hat und mit Energie und/oder Material versorgt wird und dennoch autonom arbeitet.

Automatisch wird wie oben beschrieben verstanden. Es werden Aufgaben ohne menschlichen Eingriff ausgeführt.

Umweltunabhängig bedeutet, dass ein System nicht von externen Systemen abhängt und sein Betrieb ohne zusätzliche Infrastruktur möglich ist.

Adaptiv bedeutet, dass sich das System an seine Umwelt anpassen kann und auf Veränderungen in seiner Einsatzumgebung reagiert.

Lernend wird als das Erlernen neuer Verhaltensweisen durch Reflektion von ausgeführten Handlungen verstanden. Für einen hohen Grad der Autonomie ist die Fähigkeit zu Lernen nach Antsaklis u. a. (1989) je nach Art des Systems erforderlich.

Ähnlich verhält es sich mit der Eigenschaft *Innovativ*, die von Gottschalk-Mazouz (2008) nach Knoll und Christaller (2000) interpretiert wird und bedeutet, dass ein System Verhaltensweisen entwickelt, die nicht explizit einprogrammiert wurden. Solche Verhaltensweisen führen zu einem *unvorhersagbaren* Verhalten, wodurch sich innovativ und unvorhersagbar gegenseitig bedingen.

Maurer zitiert in Maurer (2015a) und bereits in Maurer (2000, Kapitel 1.1) Feil (1987, Seite 112). Nach der speziellen Perzeption des Begriffs Autonomie bei Kant, formuliert Feil Autonomie als:

„Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten)-Gesetzes“
(Feil, 1987, Seite 112)

Nach Maurer (2015a) trifft dies auch auf autonome Fahrzeuge zu, da es für den Einsatzbereich - den öffentlichen Straßenverkehr - ein solches vom Menschen vorgegebenes Sittengesetz gibt, welches vom autonomen Fahrzeug beachtet werden muss (Maurer, 2015a). Innerhalb dieses Gesetzes hat das autonome Fahrzeug Entscheidungsfreiheit im Rahmen der durch den Menschen programmierten Verhaltensweisen. Diese Entscheidungsfreiheit besteht im Wesentlichen in der Wahl der Fahrmanöver und der Parameter, die zur operativen Durchführung der Manöver erforderlich sind.

Gottschalk-Mazouz (2008) zitiert Rammert (2003), der zur Beschreibung von Autonomie zunächst vier Bereiche von technischen Systemen identifiziert, in welchen die Eigenaktivität eines Systems zunimmt:

- „– Motorik (Antrieb und Bewegung): von unbewegt zu automotiv und automobil
- Aktorik (Arbeit und Ausführung): von fremdbetätigt bis zu eigentätig, automatisch
- Sensorik (Umwelt- und Selbstwahrnehmung): von fremdabgestimmt über umweltsensitiv bis zu selbstanpassend
- Informatik (Steuerung und Regelung): von fest verdrahtet über flexibel programmiert bis zu autonomen Systemen verteilter Problemlösung.“

(Rammert, 2003, Seite 8)

Hier wird deutlich, dass sich Autonomie nach Gottschalk-Mazouz (2008) auf das Steuerungssystem bezieht.

Rammert (2003) schlägt als Grad der Eigenaktivität in diesen vier Bereichen folgende Stufen vor:

- „(a) passiv: z.B. Werkzeuge, die in jeder Hinsicht bewegt werden und mit denen gewirkt wird;
- (b) aktiv: z.B. Maschinen, die bestimmte Operationen in mindestens einer der vier oberen Dimensionen ein Stück weit selbsttätig ausführen;
- (c) reaktiv: z.B. kybernetische Mechanismen, die für eine einfache Umweltanpassung sorgen;

- (d) interaktiv: z.B. Multiagentensysteme, die sich mittels wechselseitiger Abstimmung für eine Lösung der Aufgabe koordinieren;
- (e) transaktiv: z.B. intelligente Systeme, bisher nur menschliche Teams, die im Hinblick auf die Wechselwirkung von Eigenaktion, Fremdaktion und Gesamtktion Ziel-Mittel-Relationen selbstständig reflektieren und verändern.“

(Rammert, 2003, Seite 8)

Ein technisches System muss nach Rammert (2003) mindestens die vierte Stufe „interaktiv“ erreichen, um als autonomes System bezeichnet zu werden. Autonome Systeme der fünften Stufe enthalten zusätzlich die Fähigkeit des eigenständigen Lernens. Nach Antsaklis u. a. (1989) sind interaktive, aber nicht lernende Systeme autonom, jedoch mit einem reduzierten Grad der Autonomie.

Zusammenfassend kann ein autonomes Steuerungssystem folgendermaßen definiert werden:

Definition (Autonomes Steuerungssystem)

Ein autonomes Steuerungssystem ist in der Lage, seine Aufgabe ohne menschlichen Eingriff und ohne menschliche Überwachung zu erledigen. Der Lösungsweg der Aufgabe ist dem System nicht fest einprogrammiert. Das System passt sich an seine Einsatzumgebung an, agiert mit seinem Umfeld und reagiert auf sein Umfeld. Es ist adaptiv.

Dies impliziert, dass ein autonomes System nicht dauerhaft überwacht werden muss, da es eine Aufgabe von sich aus lösen kann. Der Mensch nimmt allenfalls die Rolle eines Beobachters und nicht die eines Überwachers ein. Eine zusätzliche Rückfallebene ist nicht erforderlich.

Hinzu kommt, dass Antsaklis u. a. (1989) und Gottschalk-Mazouz (2008) herausstellen, dass für autonome Systeme unterschiedliche Grade der Autonomie möglich sind. Diese Autonomiegrade hängen davon ab, wie die Systeme mit Unsicherheiten und technischen Fehlern umgehen können und wie sie sich an Veränderungen des Gesamtsystems, der Umwelt und der übergeordneten Ziele anpassen können.

Antsaklis u. a. (1989) fordern für einen hohen Grad der Autonomie eines Steuerungssystems integrierte Funktionen, die eine Selbstheilung, beispielsweise durch Kompensation von Hardware- und Softwarefehlern durch Rekonfiguration, innehaben. Diese Funktionen werden ohne menschlichen Eingriff erledigt, und das System wird dadurch fehlertolerant.

1.3.2.2 Differenzierung von Autonomie und Automatisierung

Eine Unterscheidung zwischen Automatisierung und Autonomie wird durch die oben stehende Definition eines autonomen Steuerungssystems möglich. Bei den automatisierten Systemen gibt es verschiedene Automatisierungsgrade, die vom Anteil der durch das Gesamtsystem übernommenen Aufgaben an der Gesamtaufgabe abhängen. In einem automatisierten System, zum Beispiel einem automatisierten Fahrzeug, ist ein Steuerungssystem integriert, das autonom handelt und so den automatisierten Betrieb des Gesamtsystems ermöglicht.

Ein automatisiertes System führt eine, mehrere oder alle Teilaufgaben einer Gesamtaufgabe/ eines Gesamtzwecks aus. In einem automatisierten Fahrzeug werden also eine, mehrere oder alle Aufgaben aus *Tabelle 1.1* ganz oder teilweise automatisiert ausgeführt.

Ein autonomes Fahrzeugführungssystem handelt eigenständig und kann sich an Veränderungen der Umwelt, des Gesamtsystems und der übergeordneten Ziele, wie zum Beispiel der Fahrmission, anpassen. Ein autonomes Fahrzeugführungssystem handelt zur Ausführung

einer Aufgabe aus *Tabelle 1.1* autonom. Bei technischen Fehlern oder einer unerwarteten Situation ist ein autonomes Fahrzeugführungssystem je nach Grad der Autonomie in der Lage weiterhin eigenständig zu handeln und die übergeordneten Ziele beispielsweise durch Rekonfiguration, erlerntes Verhalten oder Adaption zu erfüllen.

Wie die Eigenschaften der verschiedenen Automatisierungsgrade in *Kapitel 1.3.3* zeigen, benötigt ein automatisiertes Fahrzeug mit einem hohen Automatisierungsgrad, das ohne Überwachung durch den Menschen am Straßenverkehr teilnehmen soll, ein autonom handelndes Steuerungssystem, da beispielsweise Fahrentscheidungen getroffen werden müssen.

1.3.2.3 Bordautonomie

Unter Bordautonomie wird die Unabhängigkeit eines Systems von seiner Umwelt verstanden. Wie in Maurer (2000, Seite 5) beschrieben, bedeutet dies, dass ein automatisiertes Fahrzeug keine zusätzliche Infrastruktur für seinen Betrieb in einer für den Menschen geschaffenen Umgebung benötigt.

„Ein ‘autonomes Fahrzeug‘ bewegt sich in der für den Menschen geschaffenen Umgebung und benötigt keine zusätzliche Infrastruktur.“

(Maurer, 2000, Seite 5)

Ein bordautonomes System nutzt ausschließlich Daten, die es entweder im Vorfeld seines Betriebs oder mit eigener Sensorik während des Betriebs erhebt. Zu diesen zählen beispielsweise eine im Vorfeld erstellte digitale Karte oder die Messwerte der Umfeldsensorik. Eine digitale Karte, die während des Betriebs über externe Datenverbindungen aktualisiert wird, oder die Telekommunikation mit anderen Fahrzeugen (Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation) und der Infrastruktur (Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation) sind im bordautonomen Betrieb zwar möglich, aber nicht notwendig.

Bordautonomie schließt streng genommen die Nutzung eines globalen Navigationssatellitensystems aus, da die genutzten Signale von den Satelliten (Infrastruktur) ausgesendet werden. Praktisch lässt sich jedoch ohne eine globale Lokalisierung und eine digitale Karte keine Navigationsaufgabe lösen, sodass die Bordautonomie in dieser Hinsicht im wahrsten Sinne des Wortes nicht zielführend ist. Der bordautonome Betrieb ist technisch anspruchsvoller, da er die technischen Möglichkeiten zur Realisierung automatisierter Fahrzeuge einschränkt. Jedoch werden hier auch potenzielle Gefahrenquellen, wie zum Beispiel externe fehlerhafte oder manipulierte Daten, ausgeschlossen.

1.3.3 Automatisierungsgrade von Fahrzeugen

Zur weiteren Verfeinerung der Begriffe und zur Unterscheidung von Fahrerassistenzsystemen und Fahrzeugführungssystemen hinsichtlich des ermöglichten Automatisierungsgrades von Fahrzeugen werden die Rollen *Rückfallebene*, *Teleoperator* und *Fernbediener* für den Menschen definiert. Die Übernahme dieser Rollen durch den Menschen hat einen Einfluss auf den Automatisierungsgrad eines Fahrzeugs.

Der Mensch als Rückfallebene für ein technisches System muss die Kontrolle übernehmen, falls das System die Aufgabe nicht mehr ausführen kann oder ein Verlassen der Systemgrenzen droht. In einem überwachten System ist der Überwacher in der Regel auch die Rückfallebene. Der Fahrer ist also die Rückfallebene für das Fahrerassistenz- oder Fahrzeugführungssystem.

Ein Teleoperator kann ein System überwachen, obwohl er sich nicht an Bord oder in der unmittelbaren Nähe befindet (Huang, 2008). Die Überwachung basiert auf Informationen,

die über Telekommunikation an ihn übermittelt werden. Der Teleoperator kann in den Betrieb eines Systems eingreifen und somit als Rückfallebene zur Verfügung stehen. Zu beachten ist, dass es aufgrund der Verwendung von Telekommunikation zu einer Verzögerung zwischen der Datenerfassung und der Anzeige der Daten beim Teleoperator, beziehungsweise einer Steueranweisung und der tatsächlichen Ausführung im Fahrzeug kommt. Im Falle von Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr kann diese Verzögerung zu Gefährdungen führen.

Ein Fernbediener eines Systems befindet sich in Sichtweite des Systems und kann dieses über eine Fernbedienung steuern (Huang, 2008). Er steht ebenfalls als Rückfallebene zur Verfügung und kann in der Regel schneller reagieren als ein Teleoperator, da die Datenverbindung direkt von der Fernsteuerung an das System übertragen wird.

Basierend auf diesen Rollen des Menschen in automatisierten Systemen wurde eine Definition von Automatisierungsgraden von unbemannten Systemen im Rahmen der Arbeitsgruppe *Ad Hoc Autonomy Levels for Unmanned Systems Working Group (ALFUS)* (Freie Übersetzung: Ad hoc Arbeitsgruppe für Autonomiegrade von unbemannten Systemen) am *National Institute of Standards and Technology (NIST)* (Freie Übersetzung: Nationales Institut für Standardisierung und Technologie) in den USA entwickelt (Huang, 2008; Huang u. a., 2007). Hier ist zu beachten, dass im Englischen nicht konsistent von Automatisierungsgraden oder Autonomiegraden gesprochen wird. Beide Begriffe werden von Huang (2008) synonym verwendet. Im Folgenden wird nur der Begriff Automatisierungsgrad verwendet.

Das Projekt ALFUS begann 2003 mit der Definition und Klassifikation von verschiedenen Automatisierungsgraden für technische Systeme. Huang (2008) definiert den höchsten Grad *Fully Autonomous* (Wörtliche Übersetzung: vollständig autonom) als einen Betriebsmodus ohne menschlichen Eingriff. *Semi-Autonomous* (Wörtliche Übersetzung: halb autonom) sind Systeme, bei denen das System seine Aufgabe größtenteils automatisiert ausführt. Zu diesem Automatisierungsgrad gehört eine Interaktion zwischen Mensch und System. Zwischen den Phasen der Interaktion ist das System jedoch in der Lage, autonom zu arbeiten. Zusätzlich unterscheidet Huang (2008) zwischen Teleoperation und Fernsteuerung.

Die von Huang (2008) gewählten Automatisierungsgrade erlauben eine Klassifikation von Landfahrzeugen, Luftfahrzeugen, Raumfahrzeugen und Robotern. Die wesentlichen Aspekte bei der Klassifikation der Systeme sind die Mensch-Maschine-Interaktion, die Komplexität der Aufgaben (insbesondere die Anzahl der zu absolvierenden Teilaspekte der Aufgabe) und die Komplexität der Einsatzumgebung im Hinblick auf Art und zu berücksichtigende Anzahl der Elemente der Umgebung (Huang u. a., 2007).

Zur Übertragung dieser Klassifikation von unbemannten Systemen auf Fahrzeuge, die über Fahrerassistenzsysteme und / oder Fahrzeugführungssysteme verfügen, müssen die Art der Überwachung des Systems und die zur Verfügung stehende Rückfallebene betrachtet werden.

Es muss unterschieden werden, ob eine dauerhafte Überwachung durch den Fahrer erforderlich ist oder das Fahrzeug zeitweise oder dauerhaft ohne Überwachung, nur durch ein elektronisches System geführt, eingesetzt werden kann. Wird die Aktorik des Fahrzeugs nicht vollständig von elektronischen Systemen angesteuert, so handelt es sich nicht um ein automatisiertes Fahrzeug, sondern um ein manuell gefahrenes Fahrzeug mit einem oder mehreren Fahrerassistenzsystemen. Wird die Aktorik vollständig von elektronischen Systemen angesteuert und muss das System nicht dauerhaft durch den Fahrer überwacht werden, der Fahrer steht jedoch als Rückfallebene zur Verfügung, so handelt es sich um ein automatisier-

tes Fahrzeug mit einem *Fahrzeugführungssystem mit Rückfallebene Fahrer*. Bei diesen ist die Zeit, innerhalb derer der Fahrer die Kontrolle übernehmen muss, festzulegen. Da der Fahrer in diesem Fall nicht dauerhaft überwachen muss, muss er dem Verkehrsgeschehen nicht folgen und somit kann es einige Sekunden dauern, bis er zur Übernahme der Fahraufgabe bereit ist und sein muss. Eine detaillierte Untersuchung dieser Übernahmezeiten wurde von Damböck (2013) erstellt. Eine Erkenntnis aus seiner Arbeit ist eine Zeit von etwa acht Sekunden, die zwischen einer Übernahmeaufforderung und der vollständigen Übernahme durch den Fahrer vergehen können, wenn dieser durch andere Tätigkeiten abgelenkt ist (Damböck, 2013, Kapitel 7.2).

Ist eine dauerhafte Überwachung durch einen Teleoperator oder einen Fernbediener erforderlich, gilt das System weiterhin als überwacht. Auch dann, wenn es sich nur um eine Notstoppfunktion handelt, die durch eine Fernbedienung ausgelöst werden kann. Bei einem Fahrzeugführungssystem mit externer Überwachung steht ebenfalls ein Mensch zur Verfügung, der wie oben beschrieben in die Fahrzeugführung eingreifen kann. Ein solches System wird als *Fahrzeugführungssystem mit externer Rückfallebene* bezeichnet.

Wird ein Fahrzeug mit Fahrzeugführungssystem vollständig ohne Überwachung durch einen Menschen betrieben, unabhängig davon ob dauerhaft oder nicht, ist der Mensch auch keine Rückfallebene für das System. Es handelt sich um ein *Fahrzeugführungssystem ohne Rückfallebene*. Derartige Systeme sind ohne Menschen an Bord und ohne externe Überwachung nutzbar.

Weiterhin muss festgelegt werden, für welchen Anwendungsfall das System die Fahrzeugführung übernimmt. Handelt es sich um eingeschränkte Anwendungsfälle, zum Beispiel hinsichtlich der Straßenart, der Witterungsbedingungen, der Verkehrsdichte oder des Geschwindigkeitsbereichs, in denen das System genutzt werden kann, so gelten Einschränkungen, die einen Betrieb nur mit menschlicher Rückfallebene erlauben. Ein (drohendes) Verlassen der Systemgrenzen muss beispielsweise zu einer Übergabe an den Fahrer führen.

Die genannten Systemarten und die Einschränkung des Anwendungsfalls ermöglichen eine Klassifikation von Fahrzeugen hinsichtlich des Automatisierungsgrades, je nachdem wie hoch der Anteil an den Fahraufgaben eines Fahrerassistenzsystems und/oder eines Fahrzeugführungssystems ist.

In einem Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) von Gasser u. a. (2012), einem Bericht der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA, 2013) und einem Bericht der Society of Automotive Engineers (SAE, 2014) wurden derartige Automatisierungsgrade definiert und beschrieben.

Die genannten Veröffentlichungen haben maßgeblich zu einer Schärfung der Begriffe zur Fahrzeugautomatisierung beigetragen. In SAE (2014) wurden die drei Berichte in einer Tabelle gegenübergestellt (SAE, 2014, TABLE 1). Diese wurde für die vorliegende Arbeit ins Deutsche übersetzt und sind Grundlage für *Tabelle 1.2*.

Von Bartels u. a. (2015) wurden die bestehenden Klassifikationen im Rahmen des Projekts AdaptIVe⁸ zusammengetragen und zu einem Vorschlag einer konsistenten Terminologie für die Automatisierungsgrade zusammengefasst. Der Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) hat in einem Positionspapier die Terminologie von Gasser u. a. (2012) übernommen und um den fünften Automatisierungsgrad erweitert (VDA, 2015). Beim VDA wird dieser *fahrerlos* genannt. Die Automatisierungsgrade 0-4 sind identisch zu Gasser u. a. (2012). Die

⁸Homepage des Projekts AdaptIVe: <https://www.adaptive-ip.eu/> abgerufen am 02.04.2016

Unterschiede und Gemeinsamkeiten des Verständnisses des Autors der vorliegenden Arbeit zu den genannten Quellen werden im Folgenden bei der Beschreibung der Automatisierungsgrade berücksichtigt.

Tabelle 1.2 enthält die sechs von der SAE vorgeschlagenen Automatisierungsgrade, eine Zuordnung zu den Aufgaben bei der Fahrzeugführung aus Kapitel 1.1 und eine Zuordnung zu den Kategorien der BAST, dem VDA und der NHTSA. Hinzugekommen sind Spalten für die Überwachung des Fahrzeugs und der Ladung und für die Unterstützung der Insassen. Wie Maurer (2016) anmerkt, handelt es sich bei den Fahrsituationen um eine offene Menge, die sich vermutlich nicht vollständig erfassen lässt.

1.3.3.1 Automatisierungsgrad 0 - Keine Automatisierung

Dieser Automatisierungsgrad eines Fahrzeugs beschreibt die alleinige Durchführung der Fahraufgaben durch den Fahrer. Es gibt keine Eingriffe von elektronischen Systemen in die Quer- oder Längsführung des Fahrzeugs.

1.3.3.2 Automatisierungsgrad 1 - Fahrerassistenz

Die in *Kapitel 1.2* vorgestellten Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer, übernehmen die Fahrzeugführung jedoch nicht vollständig. Der Fahrer muss daher entweder die Quer- oder die Längsführung dauerhaft ausführen. Die jeweils andere Aufgabe wird mit Einschränkungen vom System ausgeführt. Es handelt sich dabei somit nicht um Fahrzeugführungssysteme. Der Fahrer wird entlastet, muss aber Fahrzeug, Fahrerassistenzsystem(e) und Umfeld überwachen und ist die Rückfallebene für alle technischen Systeme.

Es sind bereits Systeme in Serie, die sowohl in die Längsführung als auch in die Querführung eingreifen, wie zum Beispiel Fahrzeuge von Mercedes-Benz, die mit dem „Abstandsregeltempomat DISTRONIC PLUS mit Lenk-Assistent“ ausgerüstet sind (Schopper u. a., 2013). Dieser regelt die Fahrgeschwindigkeit, den zeitlichen Abstand auf vorausfahrende Fahrzeuge und hält den aktuellen Fahrstreifen durch Lenkeingriffe. Zusätzlich wird der Fahrer bei einem drohenden Verlassen des Fahrstreifens gewarnt. Die technische Realisierung der DISTRONIC PLUS mit Lenk-Assistent ist eine Kombination aus einem Abstandsregeltempomat und einem Fahrstreifenhalteassistent. Beide Systeme sind für sich betrachtet Fahrerassistenzsysteme, die jeweils dauerhaft überwacht werden müssen. Der Abstandsregeltempomat kann die Längsführung vollständig übernehmen. Der Fahrstreifenhalteassistent ist jedoch nicht in der Lage die Querführung vollständig zu übernehmen. Somit kann ein Fahrzeug, das mit der DISTRONIC PLUS mit Lenk-Assistent ausgerüstet ist, nicht als teilautomatisiertes Fahrzeug bezeichnet werden. Es erreicht den Automatisierungsgrad 1.

1.3.3.3 Automatisierungsgrad 2 - Teilweise Automatisierung

Teilweise automatisiert sind Fahrzeuge mit einem Fahrzeugführungssystem mit Rückfallebene Fahrer, das die Quer- und Längsführung übernimmt und vom Fahrer ständig überwacht werden muss. Durch technische Maßnahmen wird sichergestellt, dass der Fahrer dem Verkehrsgeschehen folgt und jederzeit die Kontrolle übernehmen kann (Gasser u. a., 2012).

Ein System dieser Kategorie ist der Autobahn-Assistent (Bartels, 2012). Dieser übernimmt die Fahrzeugführung auf der Autobahn und hält dabei den Fahrstreifen, den Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern und eine maximale vom Fahrer vorgegebene Höchstgeschwindigkeit ein. Fahrstreifenwechsel und Einfädelmanöver werden nicht automatisiert ausgeführt (Bartels, 2012; Bartels u. a., 2015). Der Fahrer ist die Rückfallebene des Systems und muss das System permanent überwachen. Der Autobahn-Assistent kann somit jederzeit an den

Auto- matisie- rungs- grad	Bezeichnung	Bedie- nung der Aktorik	Planung von Fahr- entschei- dungen	Wahr- neh- mung des Umfelds	Rückfall- ebene	Fahrsi- tuatio- nen (Sys- tem)	Überwa- chung des Fahr- zeugs	Überwa- chung der Ladung	Unter- stützung der Insassen	BAS / VDA	NHTSA
Fahrer überwacht Umfeld, Fahrzeug und Ladung und unterstützt Insassen											
0	Keine Auto- matisierung	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Keine	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Driver only	0
1	Fahrerassis- tenz	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer und System	Fahrer	Einige	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer	Assis- tiert	1
2	Teilweise Automatisie- rung	System	Fahrer und System	Fahrer und System	Fahrer	Einige	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer	Teilauto- matisiert	2
System überwacht Umfeld; Fahrer überwacht Fahrzeug und Ladung und unterstützt Insassen											
3	Bedingte Automatisie- rung	System	System	System	Fahrer (mit Zeitre- serve)	Einige	Fahrer und System	Fahrer	Fahrer	Hoch- auto- ma- tisiert	3
System überwacht Umfeld und Fahrzeug; Fahrer überwacht Ladung und unterstützt Insassen											
4	Hohe Auto- matisierung	System	System	System	System	Viele	System	Fahrer	Fahrer	Vollauto- matisiert	3/4
System überwacht Umfeld, Fahrzeug und Ladung und unterstützt Insassen; Betrieb ohne Menschen an Bord möglich											
5	Vollständige Automatisie- rung	System	System	System	System	Alle	System	System	System	VDA: fahrerlos	3/4

Tabelle 1.2: Automatisierungsgrade nach VDA (2015), SAE (2014), NHTSA (2013) und Gasser u. a. (2012) mit Erweiterungen

Fahrer übergeben. Übernimmt der Fahrer nicht, so schaltet sich das System dennoch ab. Dadurch können gefährliche Situationen entstehen. Eine Koppelung mit dem von Bartels (2012), Mirwaldt u. a. (2012) und Kämpchen u. a. (2010) und des auf *Seite 34* beschriebenen Nothalteassistenten ist daher sinnvoll, um ein unkontrolliertes Fahren des Fahrzeugs zu verhindern.

Es stellt sich die Frage, ob der Autobahn-Assistent ohne Koppelung an einen Nothalteassistenten überhaupt vertretbar ist. Diese Frage kann in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht beantwortet werden⁹.

1.3.3.4 Automatisierungsgrad 3 - Bedingte Automatisierung

Das Fahrzeugführungssystem in einem *bedingt automatisierten* Fahrzeug kann eigenständig handeln. Der Fahrer ist, im Unterschied zur Teilautomatisierung, nicht mehr verpflichtet, dem Verkehrsgeschehen dauerhaft zu folgen und das System dauerhaft zu überwachen. Das System schaltet sich im Fehlerfall oder bei Verlassen des Anwendungsbereichs nicht sofort ab, sondern der Fahrer muss die Kontrolle nach einer gewissen Vorwarnzeit übernehmen. Wenn diese Vorwarnzeit abläuft und der Fahrer nicht übernommen hat, wird das System dennoch deaktiviert, und es kann zu gefährlichen Situationen kommen. Bei den technischen Systemen, die ein Fahrzeug bedingt automatisieren, handelt es sich um Fahrzeugführungssysteme mit Rückfallebene Fahrer oder mit externer Rückfallebene. Im Gegensatz zu Bartels u. a. (2015) wird diese externe Rückfallebene hier mit aufgenommen, da es Fahrzeugführungssysteme geben kann, die extern übernommen und kontrolliert werden können und müssen.

Der von Bartels (2012) beschriebene Autobahn-Chauffeur, eine Weiterentwicklung des Autobahn-Assistenten, erfüllt diese Anforderungen. Das System ist auf einen Einsatz auf Autobahnen beschränkt. Fahrstreifenwechsel und Einfädelmanöver werden nicht nur optional automatisiert ausgeführt. Dadurch ist das Gesamtsystem als *bedingt automatisiert* einzustufen. Der Unterschied zum Autobahn-Assistent ist die nicht mehr erforderliche dauerhafte Überwachung des Systems. Jedoch ist die oben genannte Koppelung mit dem Nothalteassistenten ebenfalls nicht integriert, wodurch das Fahrzeug bei nicht erfolgreicher Übernahme durch den Fahrer und deaktiviertem Autobahn-Chauffeur nicht mehr kontrolliert wird. Aufgrund der unterschiedlichen Terminologie wird das System von Gasser u. a. (2012) als *hochautomatisiert* klassifiziert. Da sich in der vorliegenden Arbeit auf die Terminologie der SAE (2014) bezogen wird, ist dies im weiteren Verlauf der Arbeit zu beachten.

In der Entwicklung befindliche Systeme verschiedener Zulieferer und Fahrzeughersteller begrenzen den Anwendungsfall auf Stausituationen auf der Autobahn mit Geschwindigkeiten bis 60 km/h^{10 11 12}.

⁹Persönliche Meinung: Der Einsatz des Systems ist ohne Koppelung an den Nothalteassistenten nicht vertretbar. Der Nothalteassistent verhindert ein unkontrolliertes Fahren, wenn der Fahrer nicht auf eine Übernahmeaufforderung reagiert.

¹⁰Pressemeldung von Springer für Professionals vom 14. August 2014 (<http://www.springerprofessional.de/audi-testet-das-pilotierte-fahren-mit-dem-staupiloten-in-florida/5265684.html>, abgerufen am 23.03.2016)

¹¹Pressemeldung von ATZonline vom 24. Oktober 2012 (<https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/entspannter-im-stau-neues-assistenz-system-von-volvo-lenkt-eigen/6588576>, abgerufen am 23.03.2016)

¹²Pressemeldung der Volkswagen AG vom 24. Oktober 2012 (http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/themes/2011/06/Driving_without_a_Driver__Volkswagen_presents_the_Temporary_Auto_Pilot_.html, abgerufen am 23.03.2016)

Von Bartels u. a. (2015) wird auch die Möglichkeit zur Übersteuerung des Fahrers, beziehungsweise zur Verhinderung einer Übernahme durch den Fahrer, berücksichtigt. Dieser Aspekt spielt für die vorliegende Arbeit jedoch keine Rolle, da die Entwicklung hin zu vollständig automatisierten Fahrzeugen nach SAE Level 5 im Fokus steht, in denen keine Kooperation zwischen Fahrer und Fahrzeug erforderlich ist.

1.3.3.5 Automatisierungsgrad 4 - Hohe Automatisierung

Auch ein *hoch automatisiertes* Fahrzeug kann die Kontrolle an den Fahrer abgeben. Reagiert dieser jedoch nicht auf die Aufforderung zur Übernahme, kann das System, im Vergleich zur bedingten Automatisierung, selbständig weiterfahren und verhindern, dass es seine Systemgrenzen verlässt. Es handelt sich daher um ein Fahrzeugführungssystem ohne Rückfallebene.

Bei dem von Bartels (2012) beschriebenen Autobahn-Pilot, einer Weiterentwicklung des Autobahn-Chauffeur, ist dies möglich. Denkbar ist zum Beispiel ein Anhalten auf dem Seitenstreifen der Autobahn. Das System kann jederzeit während der Fahrt aktiviert werden, so lange man sich in einer für das System beherrschbaren Situation befindet. Das Fahrzeug fährt dann automatisch so nahe wie möglich an das gewünschte Ziel heran und übergibt vor Verlassen des Anwendungsfalls wieder an den Fahrer. Daraus ergibt sich, dass ein als hoch automatisiert eingestuftes Fahrzeug nur in einem bestimmten, definierten Anwendungsfall, also beispielsweise auf der Autobahn, eingesetzt werden kann. Sobald dieser Anwendungsfall verlassen werden würde, stieße das Fahrzeugführungssystem an seine funktionalen Grenzen. Es ist daher erforderlich, dass das Fahrzeugführungssystem vor einem Verlassen des Anwendungsfalls die Kontrolle an den Fahrer übergibt.

Da in den Automatisierungsgraden nach SAE (2014) nicht festgelegt ist, wie umfangreich der Anwendungsfall für ein hoch automatisiertes Fahrzeug sein muss, ist auch der von Bartels (2012) beschriebene Nothalteassistent ein Fahrzeugführungssystem, das ein Fahrzeug hoch automatisiert. Der Nothalteassistent wird aktiv, wenn der Fahrer nicht mehr fahrtüchtig erscheint. Hierfür ist eine Fahrerüberwachung erforderlich, die den Zustand des Fahrers ermittelt. Der Nothalteassistent übernimmt die Fahrzeugführung und führt je nach Ausbaustufe unterschiedliche Aktionen aus.

Bereits in Serie ist eine Ausprägung eines Nothalteassistenten, die ein Fahrzeug auf der Autobahn kontrolliert in den Stillstand abbremst und dieses Anhalten den weiteren Verkehrsteilnehmern signalisiert¹³. Dieses System ist nur aktiv, wenn der Abstandsregeltempomat und der Fahrstreifenhalteassistent des Fahrzeugs ebenfalls aktiv sind.

Eine Ausbaustufe des Nothalteassistenten ist das Anhalten auf dem Seitenstreifen einer Autobahn. Hierfür sind je nach Situation Fahrstreifenwechsel erforderlich, und der Einsatz ist auf Autobahnen oder autobahnähnliche Straßen beschränkt. Eine weitere Ausbaustufe ist der Nothalteassistent, der den fließenden Verkehr auf allen Straßenarten verlassen kann (Bartels u. a., 2012; Mirwaldt u. a., 2012; Kämpchen u. a., 2010). Ein Fahrzeug mit einem Nothalteassistent lässt sich aufgrund seiner Nutzung ohne menschliche Überwachung und der Einschränkung des Anwendungsfalls als hoch automatisiert nach SAE (2014), beziehungsweise vollautomatisiert nach Gasser u. a. (2012) klassifizieren.

¹³Systembeschreibung des *Emergency Assist* von Volkswagen (http://partner.volkswagen.de/p_51101/de/models/passat/galerie.s11_pia_trimlevel_detail.fallback.s7_layer.suffix.html/features~2Feditorial_highlights~2Fpassat~2Fassistentensysteme~2Femergency-assist/tab%3D~2Fcontent~2Fde~2Fmom~2Fholzaautos~2Fpassat~2Fjcr~3Acontent~2Fuspcategories~2Fuspcategory_2.html, aufgerufen am 23.03.2016)

Von Bartels u. a. (2015) wird auch das fahrerlose Valet-Parking diesem Automatisierungsgrad zugeordnet. Dieses System ist in der Lage, von einer definierten Position zu einer Parkposition zu fahren und dort einzuparken. Üblicherweise werden solche Systeme nicht im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt, da Parkplätze oder Parkhäuser für diese Dienstleistung bewacht sind und privat betrieben werden. In der vorliegenden Arbeit wird im weiteren Verlauf nicht auf Parkfunktionen eingegangen. Das System stellt dennoch einen Sonderfall dar, da es als hoch automatisiertes System ohne Menschen an Bord genutzt werden kann.

Die Definition des Automatisierungsgrades vollautomatisiert nach Gasser u. a. (2012) hat eine wesentliche Einschränkung, da es mit einem Fahrzeug nach dieser Definition nicht möglich ist, eine vollständige Mission automatisiert zu absolvieren. Eine Mission wird dem Fahrzeug von einem Benutzer, einem Operator oder sogar von sich selbst aufgegeben. Eine Mission besteht aus einem Startpunkt der Fahrt, einem Endpunkt mit Endzustand des Fahrzeugs und gegebenenfalls Zwischenzielen. Die Klassifizierung der SAE (2014) hat aus diesem Grund den fünften Automatisierungsgrad eingeführt, der sich in genau dieser Eigenschaft von der Vollautomatisierung nach Gasser u. a. (2012) unterscheidet. Als Grund ist hier die Definition der Mission ausschlaggebend.

Nach Maurer (2015a) und Wachenfeld u. a. (2015) sind automatisierte Fahrzeuge, die die abgegrenzten Anwendungsfälle *Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer - Autobahnpiilot* oder *Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer* beherrschen, autonome Fahrzeuge (Wachenfeld u. a., 2015). Für beide Anwendungsfälle folgt, dass diese als Automatisierungsgrad 4 - Hohe Automatisierung nach SAE (2014) einzuordnen sind. Somit sind Fahrzeuge, die diese Anwendungsfälle beherrschen, hoch automatisiert. Die Fahrzeugführungssysteme in diesen Fahrzeugen handeln autonom.

1.3.3.6 Automatisierungsgrad 5 - Vollständige Automatisierung

Bei der vollständigen Automatisierung ist das Fahrzeug in der Lage, jedes Szenario (siehe *Kapitel 2.2*) ohne Überwachung durch den Fahrer oder von extern sicher zu lösen. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Fahrsituationen um eine offene Menge (Maurer, 2016). Wenn hier von allen Situationen gesprochen wird, sind alle erfassbaren und für einen sicheren Betrieb erforderlichen gemeint. Ob dies möglich ist, ist derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Das automatisierte Fahrzeug bekommt eine Mission vorgegeben oder erstellt sich diese aufgrund einer übergeordneten Entscheidungsinstanz selbst und kann diese ohne menschliches Zutun erledigen. Das Fahrzeug übernimmt die Fahraufgaben nach *Tabelle 1.1* vollständig. Ein Betrieb ohne Menschen an Bord ist möglich.

Die Bezeichnung *fahrerlos* nach VDA (2015) impliziert, dass im Fahrzeug kein Fahrer mehr vorhanden ist. Da bei einem automatisierten Fahrzeug ein externer Überwacher eingesetzt werden kann, übernimmt ein fahrerloses Fahrzeug nicht zwingend alle Aufgaben des Menschen und kann daher auch die Automatisierungsgrade 3 und 4 erreichen. Die Bezeichnung *fahrerlos* für den Automatisierungsgrad 5 wird daher in der vorliegenden Arbeit nicht übernommen.

Wachenfeld u. a. (2015) geben zwei Beispiele für Systeme in dieser Kategorie. Das *Autonome Valet-Parking* hat zwar einen eingeschränkten Einsatzbereich, jedoch handelt es innerhalb dieser Grenzen vollständig automatisiert und ist nicht auf einen Verfügbarkeitsfahrer oder eine externe Überwachung angewiesen. Das Autonome Valet-Parking nach Wachenfeld u. a.

(2015) unterscheidet sich zum bereits erwähnten Valet-Parking nach Bartels u. a. (2015) durch den Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr, der nicht auf einen abgesperrten Bereich, wie zum Beispiel ein Parkhaus beschränkt ist.

Das *Autonome Fahrzeug auf Abruf* (im Englischen *Autonomous Vehicle-on-Demand*, (Wachenfeld u. a., 2015)) kann überall fahrerlos eingesetzt werden und muss nicht von einem Menschen überwacht werden. Eine Funktionsbeschreibung folgt in *Kapitel 1.4.1*.

Da es bei Fahrzeugen zu technischen Defekten oder nicht beeinflussbaren Ereignissen, wie zum Beispiel unverschuldeten Kollisionen, kommen kann, ist die Verfügbarkeit eines Menschen dennoch erforderlich. Diese ist jedoch nur in Szenarien notwendig, in die das Fahrzeug gewissermaßen *unverschuldet* geraten ist. Dadurch begründet sich die Notwendigkeit des Teleoperators als Verfügbarkeitskonzept nach Wachenfeld u. a. (2015). Dennoch handelt es sich um ein Fahrzeugführungssystem ohne Rückfallebene, da der Mensch während des Betriebs zur Erfüllung der Fahrmission nicht in die Fahrzeugführung eingreifen muss.

1.3.3.7 Definition für das vollständige automatisierte Fahrzeug auf Abruf

Aus den Automatisierungsgraden nach SAE (2014), den Aufgaben bei der Fahrzeugführung in *Tabelle 1.1* und der Begriffsdefinition von autonomen Fahrzeugen in *Kapitel 1.3.2* ergibt sich für die vorliegende Arbeit die folgende Definition für ein vollständig automatisiertes Fahrzeug:

Definition (Vollständig automatisiertes Fahrzeug)

Ein vollständig automatisiertes Fahrzeug ist ein Fahrzeug, das sich in einer für den Menschen geschaffenen Umgebung bewegen kann und alle Szenarien zur Absolvierung aller im Rahmen geltender Verordnungen und Gesetze erlaubten Fahrmissionen beherrscht. Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss nicht durch einen Menschen überwacht werden. Eine Rückfallebene ist nicht vorgesehen. Der Anwendungsfall lässt sich auf eine erlaubte Einsatzumgebung begrenzen. Der Betrieb im Straßenverkehr ist unbemannt möglich. Das Fahrzeugführungssystem in einem vollständig automatisierten Fahrzeug handelt autonom.

1.3.3.8 Beispiele für die Zuordnung von Systemen zu Automatisierungsgraden

In *Tabelle 1.3* werden die in *Kapitel 1.2* vorgestellten Fahrerassistenzsysteme, ausgewählte Fahrzeugführungssysteme und das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf den Automatisierungsgraden aus *Tabelle 1.2* zugeordnet.

1.3.4 Rolle des Menschen

Sind in einem automatisierten Fahrzeug Menschen an Bord, nehmen diese entweder die Rolle von Passagieren ein oder bei einem Fahrer an Bord auch die Rolle der Rückfallebene für das technische System. Die Fahrt muss für die Passagiere sicher und soll gleichzeitig auch komfortabel sein - zum Komfort gehört auch ein Gefühl der Sicherheit. Kommt es zu gefährlichen Situationen, muss das Fahrzeug sowohl andere Verkehrsteilnehmer als auch sich selbst schützen.

Das Verhalten der Insassen eines automatisierten Fahrzeugs kann für deren eigene Sicherheit ebenfalls relevant sein. Das Fahrzeug darf sich beispielsweise nicht bewegen, wenn eine Tür geöffnet ist, beziehungsweise muss es anhalten, wenn während der Fahrt eine Tür geöffnet wird. Über eine geeignete Benutzerschnittstelle müssen die Passagiere jederzeit die geplante Route ändern oder einen Stopp, beispielsweise auf dem nächsten Parkplatz, anfordern können.

Systembezeichnung	Fahraufgaben	Kriterien der Fahraufgaben	Automatisierungsgrad
Automatischer Blockierverhinderer	Fahrzeugführung - Bedienung der Aktorik	Sicherheit	1
Fahrdynamikregelung	Fahrzeugführung - Bedienung der Aktorik	Sicherheit	1
Automatische Notbremse	Fahrzeugführung (vollständig)	Sicherheit	1-2
Abstandsregeltempomat	Fahrzeugführung (vollständig)	Komfort, Sicherheit, Effizienz	1
Fahrstreifenhalteassistent	Fahrzeugführung - Wahrnehmung des Umfelds und Bedienung der Aktorik	Komfort, Sicherheit	1
Parkassistent	Fahrzeugführung - Wahrnehmung des Umfelds und Bedienung der Aktorik	Mobilität, Komfort	1
Navigationssystem	Fahrzeugführung - Wahrnehmung des Umfelds	Mobilität, Komfort	nicht anwendbar
Autobahnassistent	Fahrzeugführung (vollständig)	Mobilität, Komfort	2
Autobahn-Chauffeur	Fahrzeugführung (vollständig)	Mobilität, Komfort	3
Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer - Autobahn-Pilot	Fahrzeugführung (vollständig)	Mobilität, Komfort	4
Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer	Fahrzeugführung (vollständig)	Mobilität, Komfort	4
Nothalteassistent	Fahrzeugführung (vollständig)	Sicherheit	4
Autonomes Valet-Parking	Alle	Mobilität, Komfort	5
Vollständig automatisiertes Fahrzeug auf Abruf	Alle	Mobilität, Komfort	5

Tabelle 1.3: Zuordnung von Fahrerassistenzsystemen, Fahrzeugführungssystemen und vollständig automatisiertem Fahrzeug auf Abruf zu Automatisierungsgraden

Ein Transport von Minderjährigen ist ebenso vorstellbar. Hier erscheint die Anwendung von Vorgehensweisen aus dem öffentlichen Verkehr, wie zum Beispiel bei Bussen und Bahnen, sinnvoll. Eine Besonderheit in einem vollständig automatisierten Fahrzeug ist das mögliche Fehlen einer Begleitperson. Die Rahmenbedingungen bei der Beförderung von Minderjährigen können mit denen in fahrerlosen U-Bahnen verglichen werden. Beispielsweise werden in den fahrerlosen U-Bahnen im Verkehrsverbund Großraum Nürnberg Kinder bis zur Vollendung des vierten Lebensjahres nur mit einer Aufsichtsperson, die mindestens im schulpflichtigen Alter ist, befördert¹⁴. Gasser (2015) greift diesen Aspekt ebenfalls auf. Er nennt das von Wachenfeld u. a. (2015) beschriebene autonome Fahrzeug auf Abruf als einzigen Anwendungsfall, für den das Fehlen einer Begleitperson, die den Innenraum und die Passagiere überwacht, relevant ist. In allen anderen Anwendungsfällen nach Wachenfeld u. a. (2015) und den von Bartels (2012) beschriebenen Fahrerassistenz- und Fahrzeugführungssystemen spielt dieser Aspekt keine Rolle, da immer eine zur Fahrzeugführung berechnete Person im Fahrzeug sein muss oder keine Menschen an Bord sind.

In jedem Fall ist zur Detektion von Passagieren im Innenraum eine Überwachung notwendig. Durch diese kann die Anzahl der Passagiere erkannt werden, beispielsweise durch eine Erkennung der Sitzbelegung. Auch eine Überwachung der Vitalfunktionen von Passagieren ist vorstellbar und sinnvoll. Bei medizinischen Notfällen könnte das Fahrzeug selbständig einen Notruf durchführen und seine Position übermitteln, beziehungsweise am Straßenrand anhalten. Eine Möglichkeit für einen erzwungenen Nothalt durch die Passagiere erscheint ebenso angebracht. Durch Betätigung eines Nothalt-Schalters könnte das Fahrzeug zu einem Stopp am Straßenrand oder, falls vorhanden, auf dem Seitenstreifen gezwungen werden.

Wird ein vollständig automatisiertes Fahrzeug für den Transport von Gütern genutzt, so muss die Ladung entsprechend durch einen Menschen gesichert werden. Dies kann zwar automatisiert erfolgen, bisher sind dem Autor der vorliegenden Arbeit jedoch keine entsprechenden Verfahren bekannt. In der Regel übernimmt der Mensch die Ladungssicherung.

1.3.5 Entscheidungsbaum zur Klassifikation

Der Entscheidungsbaum in *Abbildung 1.3* ermöglicht es, je nach Rolle des Menschen den Automatisierungsgrad eines Fahrzeugs zu ermitteln. Sind keine Menschen an Bord (unbemannt), ändern sich die Anforderungen dahingehend, dass der Komfort keine Rolle spielt. Auch die Sicherheit für die Insassen ist dann nicht mehr relevant. Das Fahrzeug kann bei schwierigen Situationen die eigene Sicherheit niedriger und dadurch die Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer höher priorisieren.

Zur Klassifikation des Fahrzeugs und zur Identifikation der Rolle von Menschen muss unterschieden werden, ob eine interne oder externe Rückfallebene durch einen Menschen verfügbar ist. Bei der Rückfallebene muss weiter unterschieden werden, ob der Mensch das System dauerhaft überwachen muss. Bei einer dauerhaften Überwachung des Fahrzeugs und des Umfelds durch einen internen Überwacher sind die Automatisierungsgrade 0 bis 2 möglich. Bei einer dauerhaften Überwachung des Fahrzeugs und des Umfelds durch einen externen Überwacher ist nur der Automatisierungsgrad 2 möglich, da der externe Überwacher die Aktorik nicht dauerhaft bedient, sondern nur im Fehlerfall. Stehen interne oder externe

¹⁴Beförderungsbedingungen Verkehrsverbund Großraum Nürnberg GmbH, Teil A §3 Von der Beförderung ausgeschlossene Personen (<http://www.vgn.de/produkte/gemeinschaftstarif/kapitel/01/01.03>, abgerufen am 23.03.2016)

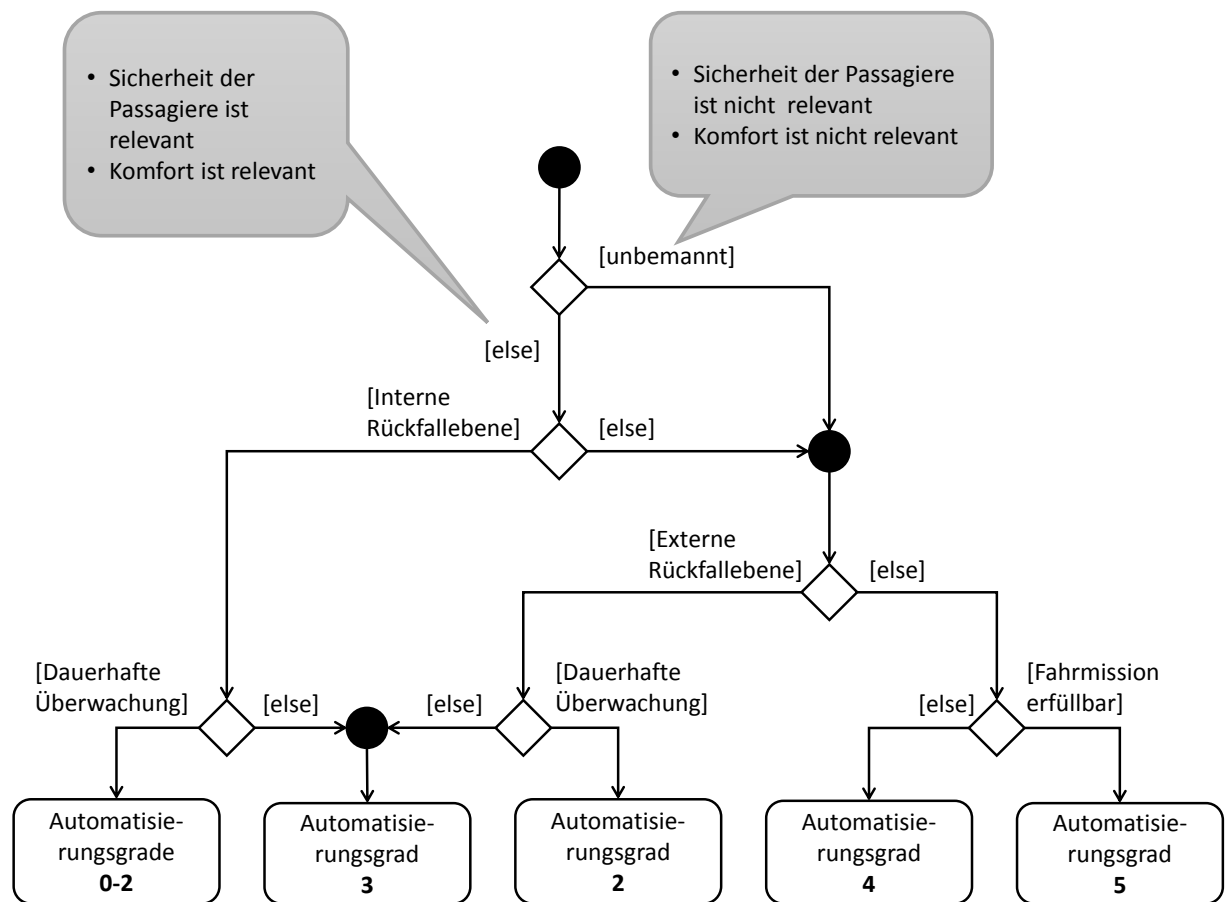


Abbildung 1.3: Entscheidungsbaum für die Automatisierungsgrade von Straßenfahrzeugen

Rückfallebene nicht sofort, sondern zeitlich verzögert zur Verfügung, so ist das Fahrzeug als Automatisierungsgrad 3 zu klassifizieren. Stehen weder interne noch externe Rückfallebene zur Verfügung, so sind die Automatisierungsgrade 4 und 5 möglich. Der Automatisierungsgrad 4 trifft zu, wenn zur vollständigen Absolvierung einer Fahrmission ein Eingriff durch den Menschen erforderlich ist. Ein automatisiertes Fahrzeug, das den Automatisierungsgrad 5 erfüllt, kann eine Fahrmission ohne Eingriffe durch den Menschen erfüllen.

Der hier vorgestellte Entscheidungsbaum unterscheidet sich zu dem von Bartels u. a. (2015) veröffentlichten Flussdiagramm durch die explizite Hinzunahme der externen Überwachung und Rückfallebene und durch die Unterscheidung, ob Menschen an Bord sind oder nicht.

1.3.6 Potential der Automatisierung von Fahrzeugen

Der Mensch wird in einem hoch oder vollständig automatisierten Fahrzeug zum Passagier und kann sich anderen Aufgaben widmen. Die Fahrzeit zum Arbeitsplatz von häufig mehr als 30 Minuten täglich¹⁵ und die Zeit auf längeren Fahrten lassen sich anderweitig nutzen. Der Stress für den Fahrer, der bei der Fahrzeugführung entstehen kann, entfällt (*Kapitel 1.1 - Kriterium Komfort*).

¹⁵Entnommen aus „STATmagazin“ vom 06. Mai 2014 des Statistischen Bundesamts (https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Arbeitsmarkt/2014_05/2014_05Pendler.html, abgerufen am 23.03.2016)

Durch die elektronische Fahrzeugführung ergeben sich auch Vorteile im Hinblick auf einen effizienten Einsatz von Fahrzeugen und Kraftstoffen (*Kapitel 1.1* - Kriterium Effizienz). So ist ein Fahrzeugführungssystem in der Lage, effizienter zu fahren, da es das Fahrzeug näher am optimalen Wirkungsgrad führen kann. Nicht nur die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs beziehungsweise die Verlängerung der Reichweite bei Elektrofahrzeugen ist möglich. Auch könnte ein Fahrzeug, während es normalerweise auf dem Parkplatz der Arbeitsstelle oder in der Garage/zu Hause stehen würde, anderweitig genutzt werden. Ein vollständig automatisiertes Elektrofahrzeug könnte beispielsweise zu einer Ladestation in der Umgebung fahren und seinen Akku laden. Bei der Parkplatzsuche bieten automatisierte Fahrzeuge einen weiteren Vorteil. Statt mit dem Fahrzeug in ein Parkhaus zu fahren, steigen die Passagiere am Zielort aus und das Fahrzeug sucht sich selbständig einen Parkplatz und parkt automatisch ein. Auf Abruf kann das Fahrzeug ausparken und die Passagiere wieder abholen (Valet-Parking) (Wachenfeld u. a., 2015; Stanek u. a., 2010; Conner u. a., 2007). Auf der Consumer Electronics Show 2013 in Las Vegas wurde der Prototyp eines solchen Systems von der Audi AG der Öffentlichkeit präsentiert¹⁶.

Ebenfalls denkbar ist, dass Fahrzeuge nicht mehr nur von einer oder einigen wenigen Personen, sondern von mehreren Personen auf Abruf genutzt werden können - Pkw werden in Deutschland durchschnittlich nur 43 Minuten täglich gefahren¹⁷. Das private Eigentum an Fahrzeugen wäre in diesem Fall nicht mehr erforderlich und Mobilität wird zur Dienstleistung. Über Telekommunikationstechnologien lässt sich Carsharing heutzutage bereits komfortabel nutzen¹⁸. Bei automatisierten Fahrzeugen entfällt zusätzlich der Weg zum Fahrzeug, da dieses selbständig zum Nutzer fährt. Dies würde auch aus demografischer Sicht große Vorteile bringen. Besonders in einer alternden Gesellschaft hinge die individuelle Mobilität nicht mehr von den Fahrfähigkeiten oder dem Gesundheitszustand eines Menschen ab (*Kapitel 1.1* - Kriterium Mobilität).

1.3.7 Rechtliche Situation für automatisierte Fahrzeuge

In diesem Kapitel werden das Verhaltesrecht und das Zulassungsrecht für Fahrzeuge betrachtet, um herauszustellen, dass neben den technologischen Fortschritten auch rechtliche Änderungen notwendig sind. Weitere Rechtsgebiete, wie zum Beispiel das Produkthaftungsrecht im Zusammenhang mit automatisierten Fahrzeugen werden beispielsweise von Gasser (2015) und Winkle (2015) diskutiert.

Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr

Das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr aus dem Jahr 1968 gilt als oberste rechtliche Grundlage der Vereinten Nationen für den Straßenverkehr und wurde 1968 von der Bundesrepublik Deutschland unterzeichnet (Bundesgesetzblatt, 1977). Für automatisierte Fahrzeuge ist der Artikel 8, der die Notwendigkeit und die Eigenschaften eines Führers

¹⁶Pressemeldung zum Audi Parkpilot vom 16. Januar 2013 (https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public/pressemitteilungen/2013/01/16/audi_erhaelt_zwei_standard_gid-oeffentlichkeit.html, abgerufen am 23.03.2016)

¹⁷Entnommen aus „Eurostat 87/2007 - Statistik kurz gefasst“ vom 27.06.2007 der Europäischen Gemeinschaft (<http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3433488/5298273/KS-SF-07-087-DE.PDF/0d50ff3c-a042-4c49-85e8-5333c92a7186?version=1.0>, abgerufen am 23.03.2016)

¹⁸Beispiele unter anderem bei „DriveNow“ (<https://de.drive-now.com/>, abgerufen am 23.03.2016) und „car2go“ (<http://www.car2go.com>, abgerufen am 23.03.2016)

von Fahrzeugen im Straßenverkehr festlegt, von besonderer Bedeutung (Lutz u. a., 2012; Bundesgesetzblatt, 1977). Darin heißt es wörtlich:

- „(1) Jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge müssen, wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben.
- (2) [...]
- (3) Jeder Führer muß die erforderlichen körperlichen und geistigen Eigenschaften haben und körperlich und geistig in der Lage sein zu führen.
- (4) Jeder Führer eines Kraftfahrzeugs muß die für die Führung des Fahrzeugs erforderlichen Kenntnisse und Fähigkeiten haben; diese Bestimmung bildet jedoch kein Hindernis für den Fahrunterricht nach den innerstaatlichen Rechtsvorschriften.
- (5) Jeder Führer muß dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.“

(Bundesgesetzblatt, 1977, Artikel 8)

In Artikel 1 v) wird der Führer als Person definiert, die ein Fahrzeug lenkt (Bundesgesetzblatt, 1977). Wie von Lutz u. a. (2012) beschrieben gibt es jedoch keine Notwendigkeit, dass sich der Führer tatsächlich im Fahrzeug befinden muss. Daraus resultiert zunächst keine Verhinderung einer Fernbedienung oder Teleoperation eines Fahrzeugs (Lutz u. a., 2012).

Ebenfalls relevant ist Artikel 13 (1) des Wiener Übereinkommens:

- „(1) Jeder Fahrzeugführer muß unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen [...]“

(Bundesgesetzblatt, 1977, Artikel 13)

Zusammengefasst sind Fahrzeuge daher rechtlich betrachtet dauerhaft von einem Menschen zu führen. Dadurch sind zunächst keine nicht durch einen Menschen überwachten Fahrzeuge erlaubt und somit auch keine Fahrzeuge der Automatisierungsgrade 3, 4 und 5. Auch unbemannte Fahrzeuge müssen demnach dauerhaft von einem Menschen überwacht werden, der dazu in der Lage ist.

Im Jahr 2014 wurden Ergänzungen und Änderungen zu dem Wiener Übereinkommen vorgeschlagen (UN, 2014a, Seite 5) und am 23. September 2014 beschlossen (UN, 2014b). Am 23. März 2016 traten diese Änderungen in Kraft.

Artikel 8 Absatz 5 des Wiener Übereinkommens regelt die Nutzung von Systemen, die die Fahraufgaben zumindest teilweise vom Menschen übernehmen. Hierbei sind zwei unterschiedliche Arten von Systemen zu betrachten. Zum einen gibt es Systeme, die zwar in die Fahrzeugführung eingreifen, die Kontrolle über das Fahrzeug aber dauerhaft dem Fahrer überlassen. Gemäß der Automatisierungsgrade nach SAE (2014) sind dies Fahrerassistenzsysteme des Automatisierungsgrades 1. Zum anderen gibt es Systeme, die dem Fahrer Teile der Fahrzeugführung oder die gesamte Fahrzeugführung abnehmen. Diese Systeme müssen vom Fahrer überstimmt und deaktiviert werden können, um erlaubt zu sein. Hierzu wurde Artikel 8 Absatz 5 entsprechend erweitert:

- „‘Every driver shall have his vehicle under control so as to be able to exercise due and proper care at all times. He shall be acquainted with the road traffic and

safety regulations, and be aware of the factors which may affect his behaviour such as fatigue, taking of medication and driving under the influence of alcohol and drugs.’

- (a) Vehicle systems which influence the way vehicles are driven shall be deemed to be in conformity with the first sentence of this paragraph and with paragraph 1 of Article 13, when they are in conformity with the conditions of construction, fitting and utilization according to international legal instruments concerning wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles.
- (b) Vehicle systems which influence the way vehicles are driven and are not in conformity with the aforementioned conditions of construction, fitting and utilization, shall be deemed to be in conformity with the first sentence of this paragraph and with paragraph 1 of Article 13, when such systems can be overridden or switched off by the driver.’“

(UN, 2014a, Seite 9)

Dies betrifft Systeme, die die Fahrzeugführung automatisieren (Automatisierungsgrade 2, 3, 4 und 5). Daher sind automatisierte Fahrzeuge nach dem Wiener Übereinkommen prinzipiell erlaubt. Der Betrieb ohne Fahrer ist jedoch nicht erlaubt, da ein Fahrer vorhanden sein muss, der das System übersteuern oder deaktivieren kann.

Deutsche Straßenverkehrsordnung

In der deutschen Straßenverkehrsordnung als nationales Verhaltensrecht zum Wiener Übereinkommen wird grundsätzlich vom *Fahrzeugführer* gesprochen. Dieser muss das Fahrzeug so bewegen, dass er andere Verkehrsteilnehmer nicht behindert und sein Fahrzeug ständig beherrscht (BMVI, 2014, §§ 1,3). Von Gasser u. a. (2012) wird die rechtliche Situation so interpretiert, dass der Fahrer ständig dazu verpflichtet ist, dem Verkehrsgeschehen zu folgen und jederzeit die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen zu können. Nach aktueller Rechtslage ist der Betrieb eines vollständig automatisierten Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr in Deutschland daher nicht erlaubt (Lutz u. a., 2012).

Europäische Richtlinien

Ein Beispiel für eine limitierende technische Vorschrift auf europäischer Ebene für automatische Fahrfunktionen ist die technische Vorschrift ECE-R79 (UN ECE-R79, 2005). In dieser ist unter anderem die Abschaltung einer automatischen Lenkfunktion in Abschnitt 5.1.6.1 geregelt. Eine automatische Abschaltung muss erfolgen, sobald das Fahrzeug schneller als 10 km/h mit einer Toleranz von 20% fährt. Dies limitiert den Einsatz von automatischen Lenkfunktionen, da in zukünftigen Anwendungen von Fahrerassistenzsystemen und Fahrzeugführungssystemen höhere Geschwindigkeiten erreicht werden sollen. Den Fahrstreifenhalteassistenten betrifft diese Regelung jedoch nicht, da dieser nur eine unterstützende und keine automatisierte Funktion ausführt:

„Whenever the Automatically Commanded Steering function becomes operational, this shall be indicated to the driver and the control action shall be automatically disabled if the vehicle speed exceeds the set limit of 10 km/h by more than 20 per cent or the signals to be evaluated are no longer being received. Any

termination of control shall produce a short but distinctive driver warning by a visual signal and either an acoustic signal or by imposing a tactile warning signal on the steering control.“

(UN ECE-R79, 2005)

Mit der *Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren* hat die Bundesregierung Maßnahmen zur Schaffung von passenden Rahmenbedingungen für automatisierte Fahrzeuge veröffentlicht (BMVI, 2015).

Rahmenbedingungen in den USA

In den Vereinigten Staaten von Amerika werden im Straßenverkehr geltende Gesetze von den einzelnen Bundesstaaten erlassen. In Nevada wurde im März 2012 zum ersten Mal weltweit der Betrieb von vollständig automatisierten Fahrzeugen im Straßenverkehr in „ADOPTED REGULATION OF THE DEPARTMENT OF MOTOR VEHICLES“ geregelt (NDMV, 2012). In Abschnitt 4. 1. wird festgelegt, dass zukünftig zugelassene vollständig automatisierte Fahrzeuge auch ohne Menschen an Bord am Straßenverkehr teilnehmen dürfen:

„Sec. 4. 1. Except as otherwise provided in section 8 of this regulation, an autonomous vehicle that has been registered in this State may be operated in autonomous mode in this State only if a certificate of compliance has been issued for the autonomous vehicle pursuant to section 16 of this regulation. If the certificate of compliance certifies that the autonomous vehicle is capable of being operated in autonomous mode without the physical presence of the operator in the vehicle, the person may operate the vehicle in this State without being physically present in the autonomous vehicle.“

(NDMV, 2012, Section 4. 1.)

In Abschnitt 16. 2. wird gefordert, dass ein vollständig automatisiertes Fahrzeug ohne fremde Hilfe selbständig aus dem Verkehr ausfädeln und am Straßenrand anhalten können muss - auch im Fehlerfall:

„2. A certificate of compliance issued pursuant to subsection 1 must certify that the autonomous technology installed on the autonomous vehicle:

(a) [...]

(b) [...]

(c) [...]

(d) Has a system to safely alert the operator of the autonomous vehicle if a technology failure is detected while the autonomous vehicle is engaged in autonomous mode, and when such an alert is given, either:

(1) Requires the operator to take control of the autonomous vehicle; or

(2) If the operator is unable to take control of or is not physically present in the autonomous vehicle, is equipped with technology to cause the autonomous vehicle to safely move out of traffic and come to a stop. Nothing in this subparagraph shall be construed to authorize or require the modification of a system installed in compliance with the Federal Motor Vehicle Safety Standards and

Regulations unless the modification can be performed without adversely affecting the autonomous vehicle’s compliance with the federal standards and regulations.“

(NDMV, 2012, Section 16. 2.)

Diese Anforderung stellt eine große Herausforderung an die Sicherheit von Fahrzeugführungssystemen dar, da beispielsweise auch auf stark befahrenen mehrstreifigen Straßen ein Wechsel vom innersten Fahrstreifen auf den Seitenstreifen trotz vorliegendem Fehler möglich sein muss, bevor auf dem Seitenstreifen angehalten werden kann. Dies entspricht einem Nothalteassistenten mit sicherem Verlassen des fließenden Verkehrs. Nach SAE (2014) ist so ein System mit einem stark begrenzten Anwendungsfall als Automatisierungsgrad 4 *Hohe Automatisierung* einzustufen (nach Gasser u. a. (2012) vollautomatisiert).

1.3.8 Zusammenfassung

Die Untersuchung der Terminologie von BASt, VDA und der SAE und eine Erweiterung der Fahraufgaben haben zu sechs Automatisierungsgraden für Straßenfahrzeuge geführt. Der entwickelte Entscheidungsbaum in *Abbildung 1.3* erleichtert die Klassifizierung von Fahrzeugen, die über Fahrzeugführungssysteme verfügen. Die wesentlichen Merkmale zur Unterscheidung der Automatisierungsgrade sind die Wahrnehmung des Umfelds, die Planung von Fahrentscheidungen, die Bedienung der Aktorik, die notwendige Überwachung des elektronischen Systems in einem automatisierten Fahrzeug durch einen Menschen und die Funktion des Menschen als interne oder externe Rückfallebene für das elektronische System. Mit der vorgestellten *Tabelle 1.2* über die Automatisierungsgrade und dem vorgestellten Entscheidungsbaum wird deutlich, welchen Automatisierungsgrad ein automatisiertes Fahrzeug erreicht. Bei der Analyse der Aufgaben der Fahrzeugführung hat sich herausgestellt, dass die Überwachung des Fahrzeugs und der Ladung und die Unterstützung der Passagiere eines automatisierten Fahrzeugs im höchsten Automatisierungsgrad, der vollständigen Automatisierung, ebenfalls durch ein elektronisches System erfolgen muss, damit ein Transport von Ladung ohne Menschen an Bord und ein Transport von Minderjährigen möglich sind. Falls das elektronische System dies nicht übernehmen kann, könnte, wie von Maurer (2016) vorgeschlagen, zusätzlich eine Aufsichtsperson an Bord sein, die nicht in die Fahrzeugführung eingreift, jedoch die Passagiere unterstützt.

1.4 Anwendungsfälle für automatisierte Fahrzeuge

In diesem Kapitel werden zwei Anwendungsfälle für automatisierte Fahrzeuge skizziert, die in den weiteren Kapiteln berücksichtigt werden. Zum einen ist dies das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf mit einem Fokus auf das Stadtgebiet, zum anderen das Projekt Stadtpilot, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstand.

1.4.1 Das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf verfolgt. Dieses ist ein Straßenfahrzeug, das eine Fahrmission vollständig ohne Überwachung durch den Menschen absolvieren kann. Eine Fahrmission besteht aus einem Zielpunkt, der angefahren werden soll und einem Zielzustand, der erreicht werden soll. Ein Zielpunkt kann hierbei jeder mit einem Straßenfahrzeug erreichbare Ort innerhalb einer digitalen Karte sein. Dies kann beispielsweise eine Position auf der Straße, ein öffentlicher Parkplatz oder eine private Garage sein. Der Zielzustand ist in der Regel das stehende

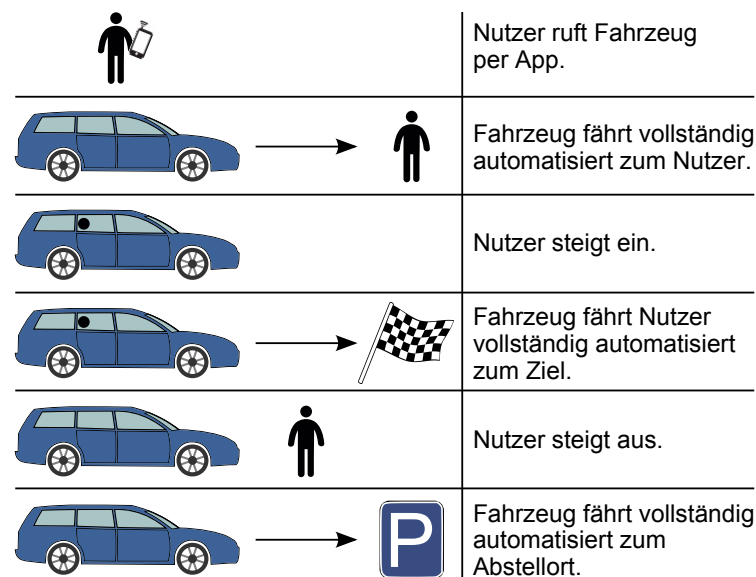


Abbildung 1.4: Vollständig automatisiertes Fahrzeug auf Abruf

Fahrzeug, entweder auf der Straße am Zielpunkt oder an einem Abstellort in der Nähe. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf dem Stadtgebiet. Daher wird primär diese Einsatzumgebung betrachtet. Besonderheiten von Landstraßen und Autobahnen werden nicht berücksichtigt. Das Fahrzeug handelt zur Erreichung des Ziels autonom und kann somit auch als autonomes Fahrzeug auf Abruf bezeichnet werden, wie dies von Wachenfeld u. a. (2015) getan wird. Das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf erfüllt alle Bedingungen des Automatisierungsgrades 5 und ist nicht auf einzelne Anwendungsfälle beschränkt. Das Fahrzeugführungssystem in diesem System benötigt keine menschliche Rückfallebene und muss nicht durch einen Menschen überwacht werden.

Die Anwendung eines solchen Fahrzeugs könnte wie in *Abbildung 1.4* dargestellt ablaufen: Ein Passagier bestellt das Fahrzeug zur Abholung an seinen aktuellen Standort und teilt sein Fahrziel mit. Das Fahrzeug fährt von seinem derzeitigen Standort zum Startpunkt der gewünschten Fahrt. Dort steigt der Passagier in das Fahrzeug ein. Das Fahrzeug fährt den Passagier zum Ziel und lässt diesen aussteigen. Je nach Wunsch des Passagiers parkt das Fahrzeug in der Nähe ein und wartet auf eine neue Fahrmission oder fährt wieder zurück zu seinem üblichen Abstellort und wartet dort.

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die Rahmenbedingungen für das vollständig automatisierte Fahrzeug skizziert. Diese resultieren in einem Anforderungskatalog an ein Fahrzeugführungssystem für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf, der in *Tabelle 1.4* zusammengefasst ist.

Nr.	Anforderung
A01	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss eine Fahrmission in seinem Einsatzgebiet ohne menschlichen Eingriff erledigen.
–A01.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur in seinem Einsatzgebiet betrieben werden können.
–A01.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die Insassen nicht gefährden.
–A01.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die weiteren Verkehrsteilnehmer nicht gefährden.
A02	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Umfeld des Fahrzeugs wahrnehmen.
A03	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen planen.
A04	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen ausführen.
A05	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Fahrzeugzustand überwachen.
A06	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Ladung überwachen.
A07	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Insassen unterstützen.
A08	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss internationale und nationale Gesetze, Verordnungen und Richtlinien umsetzen.

Tabelle 1.4: Resultierende Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf aus den Rahmenbedingungen. Untergeordnete Gliederungsebenen bedeuten eine Verfeinerung der übergeordneten Anforderungen.

1.4.2 Das Projekt Stadtpilot

Das Projekt Stadtpilot entstand 2008 als Nachfolger des Projekts CarOLO an der Technischen Universität Braunschweig und ist am Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik¹⁹ angesiedelt (Wille u. a., 2009). Bei Projektstart 2008 unter Leitung des Instituts für Regelungstechnik²⁰ waren außerdem das Institut für Flugführung²¹ und das Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund²² am Projekt beteiligt. Von 2009 bis 2013 war das Institut für Technik²³ der Universität Hildesheim über eine Kooperation mit dem Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik in das Projekt integriert. 2010 wurde das Institut für Verkehrssystemtechnik²⁴ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Mitglied im Projekt.

Das Projekt Stadtpilot ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt mit dem Ziel, einen Pkw so mit Sensorik, weiterer Hardware und Software auszurüsten, dass dieser vollständig automatisiert in einer städtischen Umgebung am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen kann. Die bei Projektstart festgelegte Strecke verläuft auf einer Distanz von etwa 11 Kilometern auf dem inneren Stadtring Braunschweigs, dargestellt in *Abbildung 1.5*. Zu den Besonderheiten dieser Strecke gehören ein- und mehrstreifige Abschnitte sowie Kreuzungen mit mehreren Fahrstreifen je Richtung. Zu berücksichtigen sind unterschiedliche Verkehrsteilnehmer, wie zum Beispiel Pkw, Lkw, Zweiräder, Fußgänger und Bau- und Rettungsfahrzeuge, wobei deren Verhalten nicht immer ordnungsgemäß und somit schwer vorhersehbar sein kann.

Aktuell werden die Versuchsträger im Projekt nur teilautomatisiert mit Sicherheitsfahrer betrieben. Dies ist für die Erforschung und Evaluation von Technologien ausreichend.

Die im Projekt erreichten Ergebnisse sind durch eine enge Zusammenarbeit der Mitarbeiter der beteiligten Institute und von zahlreichen Studierenden entstanden. Die Projekt-Infrastruktur und die allgemeinen Softwarekomponenten wurden daher teilweise kooperativ und teilweise von einzelnen Mitarbeitern erstellt. Der im Folgenden beschriebene Aufbau des Versuchsträgers, die Infrastruktur-Software und ein Großteil der funktionalen Software ist somit nicht allein durch den Autor der vorliegenden Arbeit erstellt worden, sondern von allen beteiligten Personen. Die Software zur Ansteuerung der Aktorik des Fahrzeugs, die Sicherheitskomponenten und der Entwicklungs-, Test- und Freigabeprozess wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit entwickelt.

Der Versuchsträger Leonie

Der Versuchsträger Leonie wurde 2009 in Betrieb genommen und hat seit 2010 eine Ausnahmegenehmigung für teilautomatisierte Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring. Es handelt sich um einen Volkswagen Passat B6 2,0 TDI Baujahr 2007 mit Automatikgetriebe (siehe *Abbildung 1.6*).

¹⁹Homepage des Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik: <https://www.tu-braunschweig.de/forschung/zentren/nff>, abgerufen am 23.03.2016

²⁰Homepage des Instituts für Regelungstechnik: <http://www.ifr.ing.tu-bs.de/>, abgerufen am 23.03.2016

²¹Homepage des Instituts für Flugführung: <https://www.tu-braunschweig.de/iff/>, abgerufen am 23.03.2016

²²Homepage des Instituts für Betriebssysteme und Rechnerverbund: <http://www.ibr.cs.tu-bs.de/>, abgerufen am 23.03.2016

²³Homepage des Instituts für Technik: <http://www.uni-hildesheim.de/index.php?id=5762>, abgerufen am 23.03.2016

²⁴Homepage des Instituts für Verkehrssystemtechnik: <http://www.dlr.de/ts/>, abgerufen am 23.03.2016

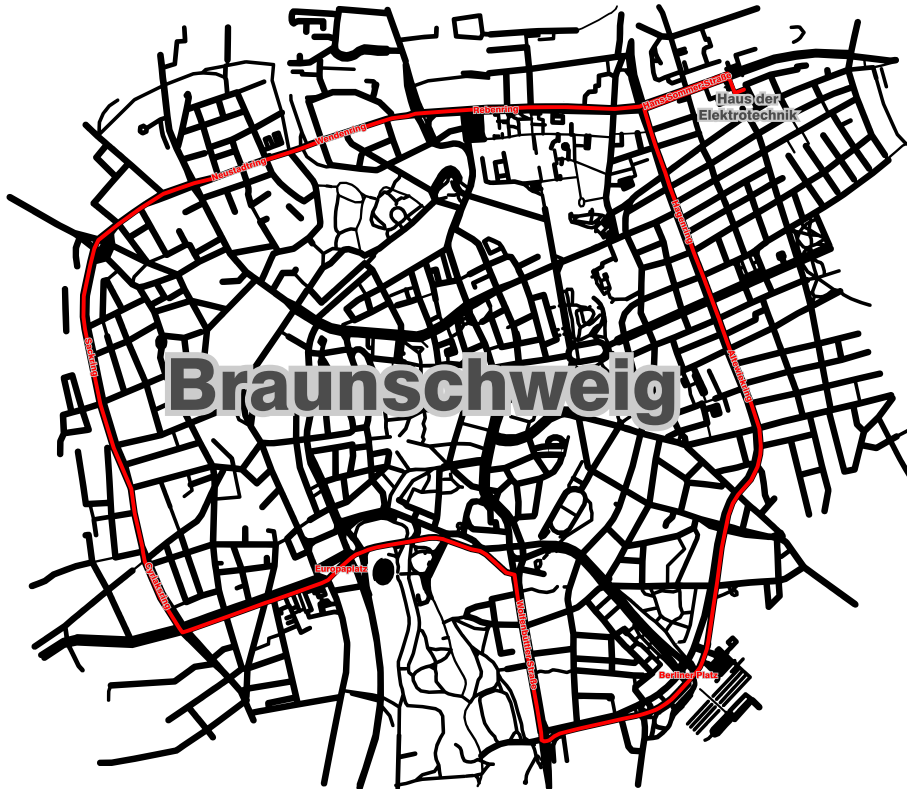


Abbildung 1.5: Stadtpilot Strecke in Braunschweig



Abbildung 1.6: Versuchsträger Leonie

Der Versuchsträger verfügt bereits serienmäßig über ein elektronisches Gaspedal zur Motorsteuerung. Durch das Automatikgetriebe ist es nicht notwendig, einen Aktor für das Getriebe bereitzustellen und durch die Möglichkeit der elektronischen Ansteuerung des Getriebes können Fahrstufen auch ohne Betätigung des Getriebewählhebels gewechselt werden. Auch das Bremssystem ist serienmäßig verblichen, jedoch wurde zusätzlich ein so genannter Bremsbooster verbaut. Dieser betätigt das Bremspedal elektromechanisch, wodurch auch eine elektronische Ansteuerung der Bremse über eine so genannte AktorikBox möglich ist. Auch die elektrische Parkbremse kann elektronisch betätigt werden. Zur Stabilisierung des Fahrzeugs sind das elektronische Stabilitätsprogramm, ein Antiblockiersystem und eine Antischlupfregelung vorhanden. Diese sind auch während des teilautomatisierten Fahrens aktiv. Zur Querführung des Fahrzeugs ist ein elektromechanisches Lenksystem verbaut. Dieses erlaubt die elektronische Ansteuerung der Lenkung über den Parklenkassistenten²⁵. Sowohl der gewünschte Lenkwinkel als auch die gewünschte Lenkgeschwindigkeit können elektronisch gestellt werden.

In der Ausnahmegenehmigung des Versuchsträgers ist vorgeschrieben, dass stets ein Sicherheitsfahrer am Steuer Platz nimmt, der die teilautomatisierten Fahrfunktionen zu jedem Zeitpunkt übersteuern und beenden kann. Im Fehlerfall ist bei Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr eine Abschaltung der teilautomatisierten Fahrfunktionen vorgesehen. Dabei werden keine Sicherheitsaktionen, wie zum Beispiel ein Nothalt, durchgeführt.

Bei der öffentlichen Präsentation des Versuchsträgers 2010 auf dem Braunschweiger Stadtring konnte das Fahrzeug auf einem Teilstück des Stadtrings dem Fahrstreifen folgen, seine Geschwindigkeit an andere Fahrzeuge anpassen und ein Wendemanöver durchführen. Die Zustände von Lichtsignalanlagen auf der Strecke wurden über die Mensch-Maschine-Schnittstelle vom Beifahrer eingegeben. Nach der Präsentation fokussierte sich die Entwicklung auf Stabilität, Sicherheit, Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation und die Fähigkeit zum Fahrstreifenwechsel. Dieser wurde 2011 zum ersten Mal erfolgreich durchgeführt (Nothdurft u. a., 2011; Ulbrich, 2011). 2012 wurde die Kommunikation mit einigen Lichtsignalanlagen auf dem Braunschweiger Stadtring in Betrieb genommen. Dazu wurden Entwicklungen aus den Projekten AIM²⁶ des DLR und KOLINE²⁷ des NFF genutzt (Bley u. a., 2011, 2012; Saust u. a., 2012). Zur Verbesserung der Forschungsmöglichkeiten wurde in den darauffolgenden Jahren im Besonderen an der Stabilität der Software und der Softwarearchitektur gearbeitet. Ein weiterer Fokus lag auf der Aktualisierung der Umfeldsensorik auf den neuesten Stand der Technik und der Erforschung von Verfahren zur Wahrnehmung des Umfelds.

²⁵Parklenkassistent der Volkswagen AG: http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/innovation/driver_assistance/parking_steering_assistance.html, abgerufen am 23.03.2016

²⁶Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (Projekt-Homepage: <http://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-6422/#gallery/25304>, abgerufen am 23.03.2016)

²⁷Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen

2 Terminologie für die vorliegende Arbeit

2.1 Sicherheit, Risiko und verbundene Begriffe¹

Unter dem Oberbegriff *Sicherheit* verbergen sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Arten von Sicherheit. Auch können viele unterschiedliche Teile des Systems Kraftfahrzeug mit Sicherheit in Verbindung gebracht werden. In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf elektronischen Fahrzeugsystemen, da sich die Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen auf diese und die darin verwendete Software fokussiert.

Im Automobilbereich unterscheidet man aktive, passive und funktionale Sicherheit (Reif (2010, Seite 10f.); Kramer (2006, Seite 3f.)). Maßnahmen zur aktiven Sicherheit unterstützen den Fahrer zur Reduzierung von Unfällen und Verkehrstoten. Da ein Fahrzeugführungssystem die Fahrzeugführung vollständig übernimmt, ist der Begriff *aktive Sicherheit* im Zusammenhang mit automatisierten Fahrzeugen irreführend. Es ist zwar denkbar, dass die Anzahl der Unfälle, Verletzten und Getöteten und die Folgeschwere von Unfällen durch den verstärkten Einsatz von automatisierten Fahrzeugen reduziert werden, jedoch unterstützt ein Fahrzeugführungssystem den Fahrer nicht, sondern übernimmt dessen Aufgaben. Daher leistet das generelle Verhalten von Fahrzeugführungssystemen einen Beitrag zur Sicherheit. In der vorliegenden Arbeit wird daher auf den Begriff aktive Sicherheit zur Beschreibung des sicheren Verhaltens von automatisierten Fahrzeugen verzichtet.

Die passive Sicherheit wird, wie schon in *Kapitel 1.2.2* erwähnt, nicht näher berücksichtigt, da sich nach Ansicht des Autors für die passive Sicherheit keine neuen oder veränderten Anforderungen an automatisierte Fahrzeuge ergeben.

Zusätzlich spielen im Hinblick auf den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen auch die Datensicherheit und der Datenschutz eine wichtige Rolle, da mit einem erhöhten Datenkommunikationsvolumen der Fahrzeuge untereinander und mit anderen Kommunikationspartnern zu rechnen ist. Diese im Englischen *security* und *privacy* genannten Bereiche werden ebenfalls nicht näher betrachtet.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt daher zum einen auf dem sicheren Verhalten von automatisierten Fahrzeugen und zum anderen auf der funktionalen Sicherheit des Fahrzeugführungssystems und seiner Komponenten.

Den Ausgangspunkt für eine konsistente Terminologie bilden bestehende Normen. Normen zur Sicherheit von elektronischen Fahrzeugsystemen beziehen sich auf Fahrerassistenzsysteme, die schon in Serie sind oder zeitnah eingeführt werden. In den Normen sind Anforderungen an das Verhalten und an Eigenschaften dieser Fahrerassistenzsysteme enthalten. Beispielsweise enthält die Norm ISO 22839² Anforderungen an Systeme zur Reduzierung der Folgeschwere von Frontkollisionen und zur Verhinderung von Frontkollisionen (ISO 22839, 2013). Die Normen ISO 15622, ISO 22178 und ISO 22179 enthalten Anforderungen an ACC Systeme mit Ausprägungen für ACC Stop & Go und Full Speed Range ACC (Deutsche Übersetzung:

¹Teile dieses Kapitels wurden bereits in Reschka und Maurer (2015) veröffentlicht.

²Sowohl für diese Norm als auch für die weiteren zitierten Normen in diesem Kapitel sind keine offiziellen Übersetzungen ins Deutsche verfügbar. Die Übersetzungen von Begriffen und deren Interpretation wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit selbst erstellt.

ACC für den vollständigen Geschwindigkeitsbereich) (ISO 15622, 2010; ISO 22178, 2009; ISO 22179, 2009). Die Norm ISO 11270 enthält Anforderungen an Fahrstreifenhaltesysteme (im Englischen *Lane Keeping Support*) (ISO 11270, 2014).

Im Bereich der funktionalen Sicherheit ist die Norm DIN EN³ 61508 für die „funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer / elektronischer / programmierbarer elektronischer Systeme“ (DIN EN 61508, 2002) als übergeordnete Norm zu nennen. Da sich die allgemeinen Inhalte dieser Norm nicht ideal auf unterschiedliche Anwendungsbereiche anwenden ließen, wurden verschiedene Normen für unterschiedliche Anwendungsbereiche von der DIN EN 61508 abgeleitet. Maßgebend für elektronische Fahrzeugsysteme ist die Norm ISO 26262 für die funktionale Sicherheit von elektrischen und elektronischen Systemen in Kraftfahrzeugen (ISO 26262, 2011).

Diese genannten Normen spiegeln den Stand der Technik wider und enthalten empfohlene Vorgehensweisen für die Entwicklung der entsprechenden technischen Systeme. Für jeden Gültigkeitsbereich sind dadurch einheitliche Vorlagen geschaffen worden, die eine sichere Entwicklung und einen sicheren Betrieb von technischen Systemen aus Sicht der funktionalen Sicherheit erlauben.

Sicherheit

Sicherheit beschreibt einen Zustand eines technischen Systems in einer Situation⁴, von dem kein unvertretbares Risiko für das System selbst und dessen Umwelt ausgeht („safety“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.103), ISO Guide 51 (2014, Seite 1), DIN EN 61508 (2002, Seite 2)). Sicherheit ist als relatives Maß zu verstehen, das von der individuellen Perspektive einer Person in einer Situation abhängt („operational situation“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.83)). Für jede betroffene Person in einer Situation muss daher die Sicherheit der Situation individuell bewertet werden. Sicherheit besteht, wenn das Risiko für jede durch den Betrieb eines Systems betroffene Person vertretbar ist (siehe *Vertretbares Risiko*, Seite 53).

In einem Fahrzeug haben verschiedene Funktionen einen Bezug zur Sicherheit. Diese werden sicherheitsrelevante Funktionen genannt („safety-related function“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.114)). Sicherheitsrelevante Funktionen können unterschiedlichste Komponenten eines Fahrzeugs betreffen, beispielsweise die Bremsanlage, Sicherheitsmaßnahmen zum Insassenschutz oder Fahrerassistenzfunktionen. Komponenten (Elemente) des Systems, die für die Sicherheit von Funktionen relevant sind, werden sicherheitsrelevante Komponenten genannt („safety-related element“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.113)).

Funktionale Sicherheit

Funktionale Sicherheit besteht, wenn ein System in einem sicheren Zustand betrieben wird und trotz drohendem Verlassen der Systemgrenzen oder im Fehlerfall („malfunctioning behaviour“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.73)) diesen nicht verlässt („functional safety“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.51)). In funktional sicheren Systemen bleibt auch in unerwarteten Situationen und Fehlerfällen ein *sicherer Zustand* (siehe Seite 54) gemäß der Spezifikation des Systems erhalten. Die Hardware und Software eines funktional sicheren Systems kann

³EN steht für Europäische Norm

⁴Für die Beschreibung der Zusammensetzung einer Situation im Kontext automatisierter Fahrzeuge siehe Kapitel 2.2

auf unerwartete Ereignisse so reagieren, dass eine Gefährdung von Menschen verhindert oder zumindest auf ein vertretbares Maß reduziert werden kann.

Ein funktional sicheres Fahrerassistenzsystem erkennt beispielsweise Fehler im System oder Schäden an der Hardware und deaktiviert sich, falls keine andere Aktion möglich ist. Dadurch wird sichergestellt, dass eine Fehlfunktion nicht zu unerwünschtem Verhalten des Systems führt. Wird eine Fehlfunktion nicht erkannt, kann der weitere Betrieb eines System zu einer Gefährdung führen.

Risiko

Unter Risiko wird eine Kombination aus den Auftretenswahrscheinlichkeiten und der Schwere von Personenschäden verstanden („risk“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.99)). Die Auftretenswahrscheinlichkeit ist ein Maß dafür, wie oft eine Situation, die zu einem Personenschaden führen kann, auftreten kann. Ein Personenschaden ist eine physikalische Verletzung einer Person („harm“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.56)). Die Schwere ist eine Schätzung der Personenschäden, die in einer gefährlichen Situation auftreten können („severity“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.120)). Ein Ereignis, das einen Personenschaden auslöst, kann einerseits im Umfeld des zu betrachtenden Systems und andererseits im System selbst auftreten. Das Risiko, das durch ein Ereignis entsteht, hängt von der Situation ab, in der sich das System befindet, da die Folgeschwere eines Ereignisses von eben dieser Situation abhängt. Hieraus resultiert eine Abhängigkeit zwischen Risiko und Situation. Beim Risiko handelt es sich daher um ein situatives Risiko.

Zumutbares Risiko

Absolute Sicherheit für Fahrzeuge gibt es nicht, da es zu viele Einflussfaktoren auf die Sicherheit gibt. Man spricht daher von einem vertretbaren Risiko beim Betrieb. Dies ist ein Risiko, das für die Gesellschaft beim Einsatz einer bestimmten Funktion oder eines Systems akzeptabel ist. Sicherheit liegt somit nur dann vor, wenn das von einem System ausgehende Risiko in der aktuellen Situation und in möglichen zukünftigen Ausprägungen der Situation unterhalb einer von einer Gesellschaft akzeptierten Schwelle liegt („unreasonable risk“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.136)). Diese Schwelle ist als nicht akzeptabler Wert in einem spezifischen Kontext gemäß gesellschaftlicher, moralischer und ethischer Auffassungen zu sehen (ISO 26262, 2011, Teil 1, 1.136).

Grunwald (2015) setzt das Risiko einer Technologie in Relation zum Nutzen eben dieser Technologie. Er stellt heraus, dass es sinnvoll ist, Metriken zur Bewertung einer Technologie zu nutzen, die sowohl mögliche Vorteile als auch Nachteile quantifizieren, um ein zumutbares Risikoniveau zu definieren. Es ist abzusehen, dass die technischen Details von automatisierten Fahrzeugen den meisten Nutzern nicht bekannt sind und diese somit nicht in der Lage sind, das Risiko des Betriebs zu beurteilen. Die Bewertung des Risikos und damit zusammenhängend auch die Verantwortung für den Betrieb von automatisierten Fahrzeugen muss daher beim Hersteller liegen. Wie Grunwald (2015) schreibt, erleben die Nutzer der Technologie das Risiko in einer passiven Rolle. Der Hersteller entscheidet somit über das vertretbare Risiko der Technologie. Dieses muss sowohl den Nutzern als auch den weiteren Verkehrsteilnehmern zumutbar sein. Im Kontext automatisierter Fahrzeuge kann man daher auch von einem *zumutbaren Risiko* sprechen. Das maximal zumutbare Risiko wird auch als Grenzkisiko bezeichnet, da es die Schwelle von einem zumutbaren zu einem unzumutbaren Risiko definiert.

Gefährdung

Eine Gefährdung („hazard“, ISO 26262 (2011, Teil 1, 1.57)) durch ein elektrisches/elektronisches System für Mensch und Umwelt tritt ein, wenn in einer Situation ein von diesem System ausgehendes Risiko auf ein höheres Niveau steigt als das Grenzkrisiko. Der Zustand des Systems ist dann nicht mehr sicher. Durch ein unerwartetes oder unwahrscheinliches Ereignis, für das keine sichere Lösung besteht, kann dieser Zustand erreicht werden.

Sicherer Zustand

Ein System oder eine Anordnung von Systemen befindet sich in einem *sicheren Zustand* („safe state“, (ISO 26262, 2011, Teil 1, 1.102)), wenn von dem System oder der Anordnung von Systemen kein unzumutbares Risiko für involvierte Personen ausgeht. In einem sicheren Zustand muss das Risiko des Betriebs des Systems unterhalb einer vertretbaren (zumutbaren) Schwelle liegen (Grenzkrisiko). Der sichere Zustand, wie er hier verstanden wird, ist somit nicht gleichzusetzen mit dem internen Systemzustand, sondern er hängt von diesem internen Systemzustand und der aktuellen Situation, in der sich das System befindet, ab. Der sichere Zustand im Kontext automatisierter Fahrzeuge ist also ein sicherer Fahrzustand des Fahrzeugs, von dem keine unzumutbare Gefahr für die Insassen des automatisierten Fahrzeugs und die weiteren Verkehrsteilnehmer ausgeht.

Der sichere Zustand wird häufig als Zielzustand im Fall von technischen Fehlern oder dem Erreichen der Systemgrenzen eines Systems verstanden, so auch bei Fahrerassistenzsystemen und Fahrzeugführungssystemen (SAE (2014); Gasser u. a. (2012); Bartels (2012); Hörwick (2011, Kapitel 3.4.2)). Obwohl der Begriff weit verbreitet ist, gibt es keine einheitliche Definition davon, welche Bedingungen je nach Situation vorliegen müssen. Sowohl in SAE (2014) als auch in Gasser u. a. (2012) gibt es keine Definition des sicheren Zustands oder der Bedingungen, die diesen definieren, obwohl der Begriff ein Unterscheidungsmerkmal hinsichtlich der Automatisierungsgrade ist. Daher wird im Folgenden eine Definition des Begriffs erarbeitet. In *Kapitel 6.3* wird diese Definition auf das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf angewendet und die Bedingungen für einen sicheren Zustand von automatisierten Fahrzeugen werden abgeleitet.

Das Risiko einer Situation kann sich einerseits durch externe Ereignisse im Umfeld des Systems, andererseits durch Ereignisse innerhalb des Systems verändern.

In einigen Veröffentlichungen wird statt von einem sicheren Zustand von einem risiko-minimalen Zustand gesprochen (Gasser u. a., 2012) oder von einer minimalen Risikobedingung (im Englischen *minimal risk condition*) (SAE, 2014). Beide Begriffe setzen das Risiko jedoch nicht in Relation zu den betroffenen Objekten. Außerdem bedeutet ein minimales Risiko nicht zwingend auch einen sicheren Zustand. Eine Definition des sicheren Zustands und des risiko-minimalen Zustands sind daher sinnvoll und notwendig, um Missverständnisse bei der Verwendung der Begriffe zu vermeiden. In *Abbildung 2.1* wird die Beziehung zwischen Risiko (x-Achse), risiko-minimalem Zustand, Grenzkrisiko und sicherem beziehungsweise unsicherem Zustand dargestellt.

Definition (Sicherer Zustand)

Der sichere Zustand eines automatisierten Fahrzeugs ist ein Zustand mit zumutbarem Risiko des Betriebs des automatisierten Fahrzeugs für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer.

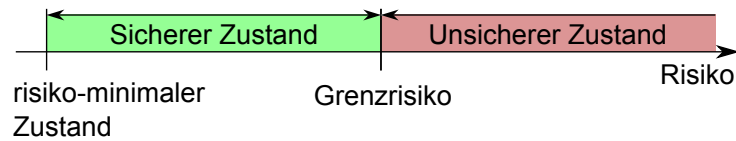


Abbildung 2.1: Risiko (x-Achse, eindimensionale Darstellung), risiko-minimaler Zustand, Grenzrisiko und sicherer beziehungsweise unsicherer Zustand

Ein risiko-minimaler Zustand kann ein höheres Risiko für einen oder mehrere Beteiligte beinhalten, als zumutbar. Dadurch kann ein risiko-minimaler Zustand ein unsicherer Zustand sein, wie in *Abbildung 2.2* dargestellt.

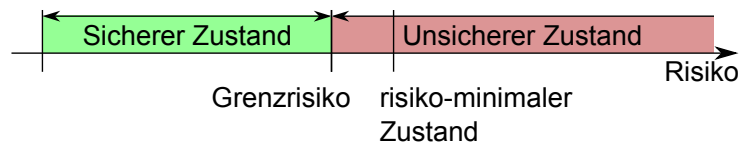


Abbildung 2.2: Risiko (x-Achse, eindimensionale Darstellung), risiko-minimaler Zustand, Grenzrisiko und sicherer beziehungsweise unsicherer Zustand; der risiko-minimale Zustand in einer möglichen Situation ist hier ein unsicherer Zustand

In *Abbildung 2.3* ist die Beziehung zwischen den aktuellen funktionalen Anforderungen an ein System und dessen funktionalen Fähigkeiten⁵ dargestellt, unter der vereinfachenden Annahme, dass funktionale Anforderungen und funktionale Fähigkeiten direkt miteinander vergleichbar sind. Die x-Achse zeigt die funktionalen Anforderungen, die sich aus einer Situation ergeben. Die y-Achse zeigt die funktionalen Fähigkeiten des Systems in einer Situation. Daraus ergibt sich, dass die Differenz aus funktionalen Fähigkeiten und Anforderungen auf der Winkelhalbierenden null ist. Die Differenz ist negativ, wenn die funktionalen Anforderungen höher als die funktionalen Fähigkeiten sind. Das System ist dann in einem unsicheren Zustand. Ist die Differenz positiv, ist das System in einem sicheren Zustand. Der risiko-minimale Zustand ist die maximal mögliche Differenz zwischen funktionalen Anforderungen und funktionalen Fähigkeiten in der aktuellen Situation. Dieser hat eine eingeschränkte Aussagekraft, wenn nur der aktuelle Zeitpunkt betrachtet wird. Werden jedoch das Risiko, die funktionalen Fähigkeiten und die Auswirkungen von möglichen Aktionen des Fahrzeugs in die Zukunft prädictiert, so kann sich das Handeln des Fahrzeugs auf die Sicherheit des Zustands auswirken. Dadurch ist eine Beeinflussung des risiko-minimalen Zustands möglich.

⁵Eine Definition des Begriffs Fähigkeit wird in *Kapitel 2.3.2* gegeben.

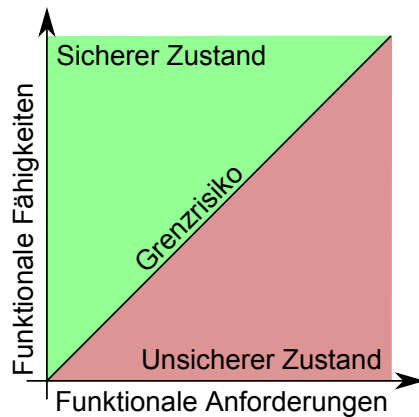


Abbildung 2.3: Funktionale Fähigkeiten im Vergleich zu den funktionalen Anforderungen zur Bewertung des Risikos; Der sichere Zustand wird durch die grüne Fläche symbolisiert und ist der Bereich, für den die funktionalen Fähigkeiten größer als die funktionalen Anforderungen sind; Das Grenzrisiko symbolisiert die Schwelle zwischen sicherem und unsicherem Zustand; Funktionale Fähigkeiten und funktionale Anforderungen sind für das Grenzrisiko gleich groß

2.2 Szenario, Szene, Situation und verbundene Begriffe⁶

Die Begriffe Szenario, Szene und Situation werden im Kontext von automatisierten Fahrzeugen verwendet, um zeitliche Abläufe des Verkehrsgeschehens zu beschreiben (Szenario) und um Zeitpunkte aus unterschiedlichen Perspektiven zu beschreiben (Szene und Situation). Im Folgenden werden diese Begriffe für die vorliegende Arbeit definiert.

Szenario

Der Begriff *Szenario* wird häufig im Kontext von Simulation und Test oder bei der funktionalen Beschreibung eines Systems verwendet.

Gemäß Jarke u. a. (1998) gibt es drei Disziplinen, in welchen häufig von Szenarien gesprochen wird. Diese drei Disziplinen sind das strategische Management, die Mensch-Computer-Interaktion und die Software- und Systementwicklung, um aktuelle und zukünftige Realitäten zu beschreiben. Go und Carroll (2004) merken an, dass sich die Verwendung des Szenariobegriffs in verschiedenen Themengebieten unterscheidet, sich die Elemente eines Szenarios jedoch ähneln. Nach Go und Carroll (2004) enthält ein Szenario: (1) Akteure, (2) Hintergrundinformationen über die Akteure und deren Umgebung, (3) Ziele und (4) eine Folge von Aktionen und Ereignissen.

Das Oxford Wörterbuch definiert ein Szenario als geforderte Folge oder Entwicklung von Ereignissen beziehungsweise den niedergeschriebenen Abriss eines Films, einer Novelle oder eines Bühnenstücks, welche Details über die Handlung und individuelle Szenen beinhaltet (Oxford: scenario, 2016). Geyer u. a. (2014) definieren, dass ein Szenario zumindest eine

⁶Der Inhalt dieses Kapitels wurde bereits in englischer Sprache in Ulbrich u. a. (2015a) und in deutscher Sprache in Ulbrich u. a. (2015b) veröffentlicht. Die Definitionen in diesen Veröffentlichungen sind das Ergebnis von zahlreichen Diskussionen unter den Autoren. Der Autor der vorliegenden Arbeit hat sich besonders zur Definition einer Szene als Zeitpunkt eines Szenarios eingesetzt. Außerdem wurde der Begriff des Testfalls auf Vorschlag des Autors der vorliegenden Arbeit vom Szenario getrennt.

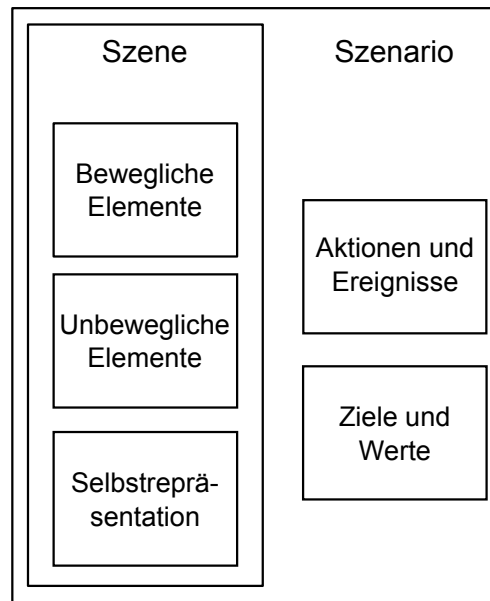


Abbildung 2.4: Zusammenhang und Elemente von Szenario und Szene; Im Gegensatz zu Ulbrich u. a. (2015a) wird hier nicht zwischen dynamischen Elementen und der Szenerie unterschieden, sondern es wird zwischen beweglichen und unbeweglichen Elementen unterschieden. Beweglich sind alle Elemente einer Szene, die in der Lage sind sich selbst zu bewegen (eigenbeweglich), oder grundsätzlich bewegbar sind. Die unbeweglichen Elemente sind von Ulbrich u. a. (2015b) zur Szenerie zusammengefasst.

Situation innerhalb einer Szene beinhaltet. Zusätzlich beinhaltet ein Szenario die andauernden Aktivitäten von einem oder beiden (mehreren) Akteuren. Entsprechend der zuvor vorgestellten Film- beziehungsweise Theatermetapher wird der Begriff eines Szenarios als ein Handlungsstrang verstanden, welcher jedoch nicht jede Aktion in allen Details umfasst. Gemäß *Abbildung 2.4* umfasst ein Szenario Szenen, Aktionen und Ereignisse sowie Ziele und Werte. Es wird daher folgendermaßen definiert:

Definition (Szenario)

Ein Szenario beschreibt die zeitliche Entwicklung von Szenenelementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche mit einer Startszene beginnt. Aktionen und Ereignisse ebenso wie Ziele und Werte können spezifiziert werden, um diese zeitliche Entwicklung in einem Szenario festzulegen. Im Gegensatz zu Szenen decken Szenarien eine gewisse Zeitspanne ab.

Ein Szenario verknüpft Szenen durch Aktionen und Ereignisse. Gemäß *Abbildung 2.5* ist ein Szenario ein einzelner Pfad in der zeitlichen Folge von Aktionen und Ereignissen (Kanten) sowie Szenen (Knoten) innerhalb des Baumes, welcher die Gesamtheit aller möglichen zukünftigen Szenarien für eine gegebene Ausgangsszene darstellt. Ein Szenario umfasst mindestens eine anfängliche Szene sowie Aktionen und Ereignisse um einen Pfad in *Abbildung 2.5* vollständig zu beschreiben. Es ist jedoch auch möglich, ein Szenario durch eine vollständige Menge von aufeinanderfolgenden Szenen zu spezifizieren. Dabei spezifizieren die Aktionen und Ereignisse dann nur noch das Verstreichen von Zeit bis zur nächsten Szene.

Ein Szenario wird typischerweise durch mehrere Szenen mit dazwischen vorgegebenen Aktionen und Ereignissen spezifiziert.

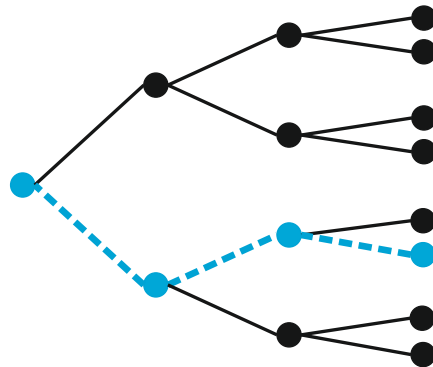


Abbildung 2.5: Ein Szenario (blau gestrichelt) als zeitliche Abfolge von Aktionen und Ereignissen (Kanten) und Szenen (Knoten); Übernommen von Ulbrich u. a. (2015a)

Szene

In der Literatur finden sich viele Definitionen des häufig verwendeten Begriffs *Szene*, die zum Teil inkonsistent sind. Thomason und Gonzalez (1985, Kapitel 3.2) schlagen einen Szenenbaum als Szenenrepräsentation vor, in welchem eine Szene in einfachere Elemente zerlegt wird und diese in einer hierarchischen Struktur repräsentiert werden. Maurer (2000, Seite 63) definiert eine Szene folgendermaßen:

„[...] räumlich-zeitliche Anordnung von physikalischen Objekten aus Sicht eines Betrachters [...]“

(Maurer, 2000, Seite 63)

Geyer u. a. (2014) nutzen zur Definition der Szene eine Analogie zum Theater: Für sie besteht eine Szene aus Szenerie, dynamischen Elementen und optionalen Fahrmanweisungen. Sie beginnt mit dem Ende der vorherigen Szene oder - im Falle der ersten Szene - mit einer vordefinierten Startszene. In einer Startszene sind alle Elemente und ihr Verhalten, sowie die Position des Ego-Fahrzeugs⁷, definiert.

Ulbrich u. a. (2015b) verstehen Geyer u. a. (2014) so, dass eine Szene nach deren Definition über eine Zeitspanne andauert. Nach dieser Definition folgt die technische Herausforderung zu identifizieren, wann genau eine Szene, beispielsweise charakterisiert durch ein mehrere Sekunden umfassendes Fahrmanöver, endet und die nächste Szene beginnt. Folglich schlagen Ulbrich u. a. (2015b) vor, von der Definition nach Geyer u. a. (2014) abzuweichen, indem eine Szene wie in Maurer (2000) als Momentaufnahme des Umfelds und der Selbstrepräsentation zu verstehen ist. Das Konzept einer Momentaufnahme schließt nicht aus, zeitliche Aspekte, wie die Zeit seit einem vergangenen Ereignis (zum Beispiel letztes Überholen), in der Szene zu repräsentieren.

Geyer u. a. (2014) verstehen optionale Fahrmanweisungen als Teil der Szene. Dem gegenüber schlagen Wershofen und Graefe (1996) vor, die Ziele eines Roboters als Teil der Situation zu verstehen. Ebenso grenzen Haag (1998), zitiert nach Pellkofer (2003, Seite 4), und Krüger (1991), zitiert nach Pellkofer (2003, Seite 4), eine Szene gegenüber einer Situation durch den Aspekt der Handlungen und Handlungsalternativen ab. Damit verbunden sollte der Aspekt der Selbstrepräsentation wie von Maurer (2000), Bergmiller (2014) und Reschka (2015)

⁷Beim Ego-Fahrzeug handelt es sich um das automatisierte Fahrzeug.

Berücksichtigung finden. Für das automatisierte Fahren schlagen Ulbrich u. a. (2015b) vor, zielspezifische Fahrhinweise als Teil der Situation zu verstehen und die von Geyer u. a. (2014) angesprochenen Fahrhinweise als Information und Teil der Selbstrepräsentation innerhalb einer Szene anzusehen. Als Resultat wird hier eine Szene in Anlehnung an Ulbrich u. a. (2015a) folgendermaßen definiert:

Definition (Szene)

Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die beweglichen und unbeweglichen Elemente des Umfelds, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter und die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst. Einzig eine Szenenrepräsentation in einer simulierten Welt kann allumfassend sein (objektive Szene). In der realen Welt ist sie immer unvollständig, fehlerbehaftet, unsicherheitsbehaftet und aus der Perspektive eines oder mehrerer Beobachter (subjektive Szene).

Ein Akteur ist in dieser Definition ein selbst handelndes Element. Ein Beobachter ist ein wahrnehmendes Element innerhalb der Szene oder eines, dass die Szene als Ganzes betrachtet. Ein Element kann gleichzeitig Beobachter und Akteur sein. Bewegliche Elemente bewegen sich aktuell (und sind somit aktuell dynamisch) oder bewegen sich aktuell nicht (und sind somit aktuell statisch), haben aber die Fähigkeit sich zu bewegen. Diese Definition weicht von Ulbrich u. a. (2015b) ab, da dort der Begriff dynamisch mit beweglich gleichgesetzt wird und keinen zeitlichen Bezug aufweist. Die unbeweglichen Elemente der Szene werden als Szenerie bezeichnet und sind alle räumlich stationären Elemente der Szene.

Eine in der Realität wahrgenommene Szene ist immer eine subjektive Sicht auf die Welt. Selbst wenn viele Beobachter ihre Informationen teilen, entsteht keine objektive Szene, sondern nur eine subjektive Szene aus der Perspektive mehrerer Beobachter. Einzig in der Simulation kann eine objektive Szene (vollständig, nicht-fehlerbehaftet, frei von Unsicherheiten) durch einen allwissenden Beobachter bereitgestellt werden. Eine Folge von Szenen kann genutzt werden, um die zeitliche Entwicklung in einem Szenario darzustellen.

Für bewegliche und unbewegliche Elemente in der Szenerie müssen auch Informationen über nicht modellkonforme Elemente repräsentiert werden. Dies können Informationen über nicht klassifizierbare, nicht verfolgbare oder nicht segmentierbare Messungen beziehungsweise schlicht nicht zum Entwicklungszeitpunkt bedachte Objektklassen sein. Das Vorhandensein solcher Elemente kann aus Sicht der funktionalen Sicherheit für die Bewertung einer aus der Szene extrahierten Situation relevant sein.

Die Szenenrepräsentation wird komplettiert durch eine Selbstrepräsentation der Akteure und Beobachter. Diese kann das aktuelle Level der Fähigkeiten umfassen (*Kapitel 10.5*). Solch eine Selbstrepräsentation kann im einfachsten Fall aus Lebenszeichen-Signalen einzelner Komponenten oder Sichtbereichen und Verdeckungen bestehen. *Abbildung 2.6* zeigt eine beispielhafte Repräsentation einer Szene für ein automatisiertes Fahrzeug. Ähnliche Kontextmodelle beziehungsweise Welt-Modelle wurden bereits von Homeier und Wolf (2011), Ulbrich u. a. (2014) und Schmidt u. a. (2014) präsentiert.

Situation

Für den Begriff der Situation gibt es in der Literatur analog zur Szene ebenfalls unterschiedliche Verwendungen. Wershofen und Graefe (1996) zitiert von Maurer (2000) verstehen unter einer Situation Folgendes:

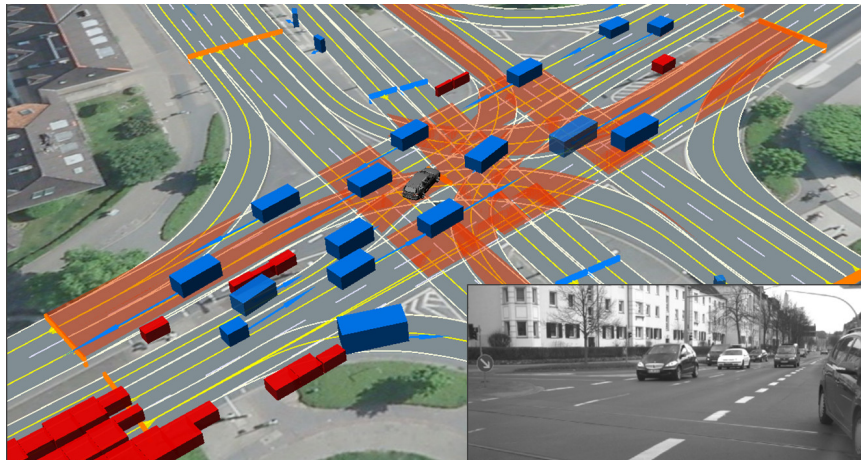


Abbildung 2.6: Illustration einer (subjektiven) Szenenrepräsentation; erstellt von Jens Rieken

„Gesamtheit der Umstände, die vom Roboter bei der Auswahl eines in dem jeweiligen Moment geeigneten Verhaltensmusters zu berücksichtigen sind.“

(Wershofen und Graefe, 1996, S. 171)

In der Psychologie definiert Wirtz (2014) die Situation folgendermaßen:

„Gesamtsachlage, aus der ein bestimmtes Verhalten des Menschen folgt.“

(Wirtz, 2014, Situation)

Reichardt (1996) definiert eine Situation als die Vereinigung von den Untermengen der internen und externen Situation. Die interne Situation besteht aus den Submengen zur Beschreibung des Fahrzeugzustands und einer Benutzereingabe. Die externe Situation besteht aus Umfeldinformationen, welche die Straße, Hindernisse und Verkehrszeichen beschreiben. Er beschränkt seine Situationsdefinition auf die von ihm sogenannte Diskurswelt eines automatisierten Fahrzeugs als Untermenge der realen Welt (Reichardt, 1996, Kapitel 3.1).

Gemäß Haag (1998), zitiert von Pellkofer (2003, Seite 4), ist der Unterschied zwischen einer Szene und einer Situation der Handlungsaspekt. Krüger (1991), der ebenfalls von Pellkofer (2003, Seite 4) zitiert wird, definiert eine Situation als erweiterten Zustand, bei dem Akteure nicht nur als physikalische Gegenstände (Objekte) betrachtet werden, sondern zusätzlich deren Handlungen und Handlungsalternativen, um so die zeitliche Entwicklung der Situation abzuschätzen. Diese Akteure werden von (Pellkofer, 2003, Kapitel 1.1) basierend auf Dickmanns (1989) als Subjekte bezeichnet.

Pellkofer (2003) definiert eine Situation als

„die Summe der für die Verhaltensentscheidungen relevanten Sachverhalte. Relevant für die Verhaltensentscheidung sind die aktuelle Szene, die Intentionen und Aktionen aller Subjekte in der Szene (einschließlich des Eigenfahrzeugs) und die Fähigkeiten des Eigenfahrzeugs, welche die Entscheidungsalternativen darstellen.“

(Pellkofer, 2003, Seite 4)

Dem gegenüber verstehen Ulbrich u. a. (2015b) die Fähigkeiten nicht als Entscheidungsalternativen, sondern als Eingangsgröße für einen Entscheidungsfindungsprozess, um Entscheidungsalternativen abzuleiten.

Für Mock-Hecker (1994) ist

„eine Verkehrssituation [...] dabei der zu einem bestimmten Zeitpunkt existierende Zustand des erfassten Ausschnitts der Verkehrswelt, der [...] durch bestimmte physikalische Zustandsgrößen der involvierten Fahrzeuge, den zu diesem Zeitpunkt von den Fahrzeugen durchgeführten Aktionen und den erwarteten Plänen der Agenten beschrieben wird. Die aus dieser Definition resultierende Beschreibung einer Verkehrssituation schließt nicht nur den aktuellen Zustand der Verkehrswelt in einer bestimmten Verkehrssituation ein, sondern auch deren wahrscheinliche weitere Entwicklung.“

(Mock-Hecker, 1994, Seite 1)

Damit umfasst für Mock-Hecker eine Situation nicht nur den aktuellen Zeitpunkt sondern auch die erwartete zukünftige Entwicklung.

Auch für die Wahl einer Situationsdefinition spielt ihre technische Umsetzbarkeit eine große Rolle. Ulbrich u. a. (2015b) empfehlen eine Situation, wie von Mock-Hecker (1994, Seite 1) beschrieben, als Momentaufnahme der Gesamtheit an Umständen zu verstehen, die vom Roboter (Akteur) bei der Auswahl eines in dem jeweiligen Moment geeigneten Verhaltensmusters zu berücksichtigen sind. Dadurch kann einmal mehr die technische Herausforderung vermieden werden, Anfang und Ende einer länger andauernden Situation klar definieren zu müssen.

Eine weitere Herausforderung zur Definition des Begriffs Situation ergibt sich aus den häufig in Architekturen für automatisiert fahrende Fahrzeuge vorkommenden Modulen zur *Situationsbewertung* oder *Situationsanalyse*. Eine Situationsanalyse nutzt eine Situation als Eingangsgröße und interpretiert bestimmte Aspekte davon. Folglich kann das Resultat einer Situationsbewertung als Augmentierung der anfänglichen Situation bezüglich bestimmter Aspekte angesehen werden. Reichel u. a. (2010) und Siedersberger (2003) haben hierfür den Begriff von *Situationsaspekten* geprägt.

Geyer u. a. (2014) definieren eine Situation als eine Menge an Kriterien, welche eingehalten werden müssen, um eine assoziierte Aktion auszuführen. Genauso wie für ihre Szenendefinition wird das Ende einer Situation durch die Änderung solcher Kriterien definiert. Ulbrich u. a. (2015a) stimmen Geyer u. a. (2014) zu, dass abhängig von Handlungen und Handlungsalternativen die selbe Szene in verschiedene Situationen resultieren kann. Die Illustration der von Geyer u. a. (2014, S. 185) postulierten Ontologie scheint hingegen die Szene vollständig als Teil der Situation zu verstehen. Die Situation sollte Resultat einer Auswahl und Augmentierung von Szeneninformationen sein. Sie basiert auf transienten oder permanenten Zielen und Werten (Wershofen und Graefe, 1996).

Angenendt (1987) nimmt an, dass eine

„Situation mehr als nur eine Momentaufnahme des Verkehrsgeschehens mit Hilfe von [verkehrs]anlage- und umfelderfassenden Kenngrößen ist.“

(Angenendt, 1987, Seite VIII)

Darüber hinaus sollte eine Situation Informationen bezüglich des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern und den daraus resultierenden informellen Verhaltensregeln umfassen. Er nutzt das Konzept eines Verhaltenskontexts (*behavior setting*), um die informell befolgten Regeln abzubilden (Angenendt, 1987, Seite 22ff.). Ulbrich u. a. (2015a) stimmen zu, dass dieser Verhaltenskontext integraler Bestandteil einer Situation ist und schlagen vor, ihn als Teil der Ziele und Werte in einer Situation zu repräsentieren.

von Benda (1985) definiert die Verkehrssituation als beschränkten Ausschnitt aus dem gesamten Verkehrsgeschehen, der durch den Fahrer wahrgenommen wird. Damit führt sie den Aspekt der *Sicht* beziehungsweise Betrachtungsperspektive (*point of view*) ein.

Dickmanns (2007, Anhang A) definiert eine Situation als die Sammlung aller umweltbezogenen und übrigen Umstände, welche einen Einfluss auf die Wahl geeigneter Entscheidungen im Missionskontext haben. Dickmanns's Kriterium der Fahrfunktionsrelevanz wird hier übernommen.

Schmidt u. a. (2014) unterscheiden zwischen einem wahren Weltmodell (*true world model*), einer wahren Situation (*true situation*) für einen individuellen Beobachter und einer subjektiven Situation als Sicht eines Beobachters. Während in diesem Beitrag die Möglichkeit einer wahren Situation in einer perfekt simulierten Welt nicht ausgeschlossen wird, ist eine Situationsrepräsentation in der realen Welt in einem technischen System immer unvollständig, unsicher und aus einer subjektiven Perspektive.

Anhand der genannten Quellen ist festzustellen, dass die Festlegung einer generellen und allgemein gültigen Definition des Begriffs Situation eine Herausforderung darstellt. Dennoch wird von Ulbrich u. a. (2015a) folgende Definition vorgeschlagen und für die vorliegende Arbeit übernommen:

Definition (Situation)

Eine Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. Eine Situation wird aus der Szene durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet, basierend auf transienten (z.B. missionspezifischen) wie auch permanenten Zielen und Werten. Folglich ist eine Situation immer subjektiv, indem sie die Sicht eines Elements repräsentiert.

Eine Situation besteht aus zahlreichen Situationsaspekten, welche von einer Situationsbewertung interpretiert und analysiert werden. Eine Situation ist zugleich Eingangsgröße und Resultat eines solchen Moduls.

Entsprechend der Situationsdefinition kann eine Situation vollständig aus einer Szene und den Zielen und Werten eines Systems abgeleitet werden. Dies wird durch das Venn-Diagramm in *Abbildung 2.7* illustriert. Es gibt eine große Schnittmenge zwischen einer Szene und einer Situation, um alle relevanten Aspekte der Szenerie, alle relevanten dynamischen Elemente und alle relevanten Aspekte der Selbstrepräsentation zu symbolisieren. Diese Überlappung zeigt den Informationsselektionsprozess, welcher hilft, die Situationsrepräsentation gegenüber der Szene zu vereinfachen. Darüber hinaus wird eine Situation implizit oder explizit beispielsweise durch Ziele und Werte augmentiert. Beispiele hierfür sind das explizite Bewerten der Nützlichkeit eines Fahrstreifens, um das Missionsziel zu erreichen, oder die Bewertung der Relevanz eines am Straßenrand spielenden Kindes gegenüber einer über die Straße fliegenden Plastikverpackung. Der verbleibende Teil im Venn-Diagramm, welcher weder mit der Szene

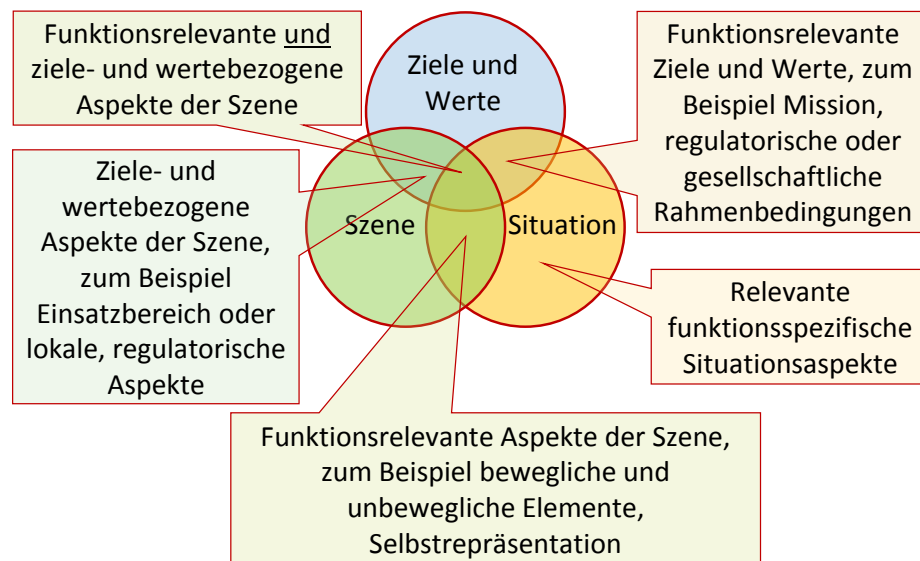


Abbildung 2.7: Venn-Diagramm von Szene, Situation und Zielen und Werten eines Elements; Übernommen von Ulbrich u. a. (2015b) und an die Terminologie der vorliegenden Arbeit angepasst

noch den Zielen und Werten überlappt, repräsentiert Informationen aus Situationsaspekten, welche durch eine Situationsbewertung evaluiert und angereichert wurden.

Die Anzahl der Elemente einer Situationsrepräsentation weicht von denen der Szene durch die zuvor bereits vorgestellte ziel- und wertspezifische Informationsselektion und die Augmentierung ab. Entsprechend *Abbildung 2.7* gibt es einen großen Überlappungsbereich zwischen Szene und Situation bezüglich der beinhalteten Informationen. Der wesentliche Unterschied ist, dass nur funktionsrelevante Informationen Teil der Situation sind.

2.3 Fahrmanöver, Fertigkeit und Fähigkeit

Die Begriffe Fertigkeit und Fähigkeit sind in der vorliegenden Arbeit eng mit den Fahrmanövern verknüpft. Alle drei Begriffe werden daher im Folgenden definiert.

2.3.1 Fahrmanöver

Der Begriff Fahrmanöver wird in der vorliegenden Arbeit von Dickmanns (2007) übernommen. Ein Fahrmanöver stellt ein Manöver dar, das einen festgelegten Beginn und ein festgelegtes Ende hat. (Dickmanns, 2007, Seite 43) definiert Fahrmanöver folgendermaßen:

„‘Maneuvers’ as typical time histories of control outputs for achieving desired transitions from one regime of steady behavior to another last up to several minutes.“

(Dickmanns, 2007, Seite 43)

Wörtliche Übersetzung: Manöver, als typische zeitliche Verläufe von Steuersignalen zur Erreichung von gewünschten Übergängen von einem Regelwerk stabilen Verhaltens zu einem anderen, können bis zu mehrere Minuten andauern.

Nach der Definition von Dickmanns (2007) werden beim Wechsel von einem Fahrmanöver zu einem anderen die Regelgrößen verändert. Zu Beginn einer Fahrt steht das Anfahren, am

Ende hält das Fahrzeug in einem gewünschten Zustand an. Dazwischen werden sequenziell unterschiedliche Manöver ausgeführt, die jeweils durch ein von extern beobachtbares Verhalten gekennzeichnet sind. Für einen externen Beobachter eines Fahrzeugs kann der Übergang zwischen einzelnen Manövern eines Fahrzeugs fließend erscheinen.

2.3.2 Fertigkeiten und Fähigkeiten

Wie Bergmiller (2014, Seite 144ff.) schreibt, werden die Begriffe Fertigkeit und Fähigkeit nicht immer konsistent verwendet. Daher gibt es keine einheitliche Definition dieser für technische Systeme. Im Kontext automatisierter Fahrzeuge wurden beide Begriffe von Pellkofer (2003, Kapitel 1.1.2 und 3.3) und Siedersberger (2003, Kapitel 6) verwendet, um Verhaltensentscheidungen basierend auf Fertigkeiten und Fähigkeiten zu beschreiben. Bergmiller (2014, Kapitel 8.2.1) greift deren Begriffsverständnis auf und definiert beide Begriffe mit dem Fokus auf die Aktorik eines Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Sportwissenschaft.

Da es durch diese teils widersprüchlichen Definitionen und Verwendungen der Begriffe zu einem inkonsistenten Begriffsverständnis kommen kann, werden beide Begriffe im Folgenden für die vorliegende Arbeit definiert. Zunächst wird die Verwendung der Begriffe in der Psychologie und den Sportwissenschaften zusammengefasst, und eine für den Menschen zutreffende Terminologie wird beschrieben. Danach werden die Begriffe auf technische Systeme übertragen und abschließend eine konsistente Definition für die vorliegende Arbeit erstellt.

Da einige der genannten Quellen in englischer Sprache veröffentlicht sind, wird folgende Übersetzung vorgeschlagen. Eine Fertigkeit wird im Englischen als *skill* bezeichnet, eine Fähigkeit wird im Englischen als *ability* bezeichnet (Wirtz, 2014, Fertigkeit).

2.3.2.1 Fertigkeiten und Fähigkeiten in der Psychologie und der Sportwissenschaft

In der Psychologie werden die beiden Begriffe vielfältig diskutiert. In Wirtz (2014) ist eine Definition enthalten, die von zahlreichen Experten erstellt wurde. Diese dient als Ausgangspunkt.

Fertigkeit Eine Fertigkeit ist nach Wirtz (2014, Fertigkeit)

„... eine beschreibende Bez[eichnung] für aufgabenbezogene [...] menschliche Aktivitäten; ...“

(Wirtz, 2014, Fertigkeit)

Hierunter zählen motorische, kognitive, kognitive motorische, soziale, sprachliche und perzeptive Fertigkeiten (Wirtz, 2014, Fertigkeit). Eine Aktivität ist ein Prozess, der in einem System stattfindet. Eine Aktivität kann eine Informationsaufnahme, eine Informationsverarbeitung oder eine Bewegung von Muskeln sein oder eine Kombination aus den drei Kategorien. Aktivitäten können von außen wahrnehmbar sein, wie zum Beispiel Bewegungen, Sprache, Gestik und Mimik. Kognitive und perzeptive Aktivitäten sind von außen nicht wahrnehmbar, sondern betreffen die informationsverarbeitenden und informationsaufnehmenden Prozesse des Menschen. Die Leistung einer Fertigkeit, mit der eine Aktivität ausgeführt werden kann, lässt sich nach Wirtz (2014, Fertigkeit) messen. Fertigkeiten werden beherrscht beziehungsweise erworben und ihre Leistung ist abhängig von den Fähigkeiten des Menschen (Wirtz, 2014, Fertigkeit).

Bergholz (2003, Seite 75) bezeichnet die Differenzierung zwischen Fertigkeiten und Fähigkeiten ebenfalls als schwierig und nicht immer konsistent. In der Sportwissenschaft wird der Begriff meist verwendet, um eine nach außen wahrnehmbare Aktivität zu beschreiben, die mit einer bestimmten Qualität ausgeführt wird. Die Fertigkeit ist dadurch als Qualitätsmaß zu verstehen und kann gemessen und verglichen werden (Bergholz, 2003, Kapitel 5.2). Da sich Bergholz (2003) intensiv mit den Quellen aus der Psychologie, der Pädagogik und der Sportwissenschaft auseinander gesetzt hat, wird an dieser Stelle auf eine tiefer gehende Diskussion verzichtet. Das Begriffsverständnis von Bergholz (2003) wird von Bergmiller (2014) übernommen, da es sich zur Beschreibung der nach außen sichtbaren Aktionen eines Fahrzeugs eignet und mit der Definition von Wirtz (2014) übereinstimmt. Weiterhin stimmt dieses Begriffsverständnis mit den Definitionen in der Didaktik überein. (Böhmer, 2017)

Fähigkeit Eine Fähigkeit ist nach Wirtz (2014, Fähigkeit)

„...die Gesamtheit der zur Ausführung einer bestimmten Leistung erforderlichen personalen Bedingungen.“

(Wirtz, 2014, Fähigkeit)

Bergholz (2003, Kapitel 5.3) folgt dieser Definition, die bereits in früheren Ausgaben von Wirtz (2014) enthalten ist. Die von Bergholz (2003, Kapitel 5.3) geführte Diskussion des Begriffs soll daher an dieser Stelle ebenfalls übernommen werden. Eine Fähigkeit wird demnach als persönliche Voraussetzung zur Erlernung und Ausführung von Fertigkeiten verstanden. Dies kann die Kraft in einem Muskel, die Sehfähigkeit der Augen oder eine andere Eigenschaft sein, über die ein Mensch naturgemäß verfügt. Fähigkeiten können trainiert und dadurch verbessert werden.

Zusammenhang zwischen Fertigkeiten und Fähigkeiten Werden Fähigkeiten als persönliche Voraussetzungen und Fertigkeiten als erlernte Aktivitäten angesehen, entsteht ein Zusammenhang zwischen diesen. Erlernt oder verbessert man eine Fertigkeit, so verändern sich auch die dafür benötigten Fähigkeiten. Verändern sich die Fähigkeiten, so verändert sich die Leistung der diese Fähigkeiten nutzenden Fertigkeiten.

Folgendes Beispiel soll diesen Zusammenhang verdeutlichen. Ein Kleinkind kann über alle erforderlichen Fähigkeiten für die Fertigkeit Laufen verfügen. Der Bewegungsablauf für die Fertigkeit Laufen muss jedoch erst erlernt werden und steht somit nicht sofort zur Verfügung. Die Bewegung der eigenen Muskeln ist dagegen bereits möglich und die Voraussetzungen für den Gleichgewichtssinn und zur Steuerung der Muskeln sind vorhanden. Während des Erlernens der Fertigkeit Laufen werden die Muskeln trainiert und der Gleichgewichtssinn bildet sich weiter.

2.3.2.2 Fertigkeiten und Fähigkeiten in technischen Systemen

In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass ein technisches System während des Betriebs nicht lernt. Zwar können Lernverfahren zur Verbesserung der Algorithmen eingesetzt werden. Diese arbeiten jedoch nicht im Betrieb, sondern beispielsweise auf aufgezeichneten Daten beim Hersteller. Durch Aktualisierungen können die durch das Lernen verbesserten Algorithmen in das automatisierte Fahrzeug übertragen werden. Während des Betriebs ändern sich diese jedoch nicht. Veränderungen an den Komponenten des Systems treten somit nur durch äußere Einflüsse, interne Fehler und Verschleiß auf. Die Fertigkeiten eines Systems werden anders als beim Menschen nicht vom System erlernt, sondern werden dem

System während dessen Entwicklung in Form von Hardware und Software zur Verfügung gestellt.

Fertigkeit Eine Fertigkeit in einem technischen System beschreibt eine Aktivität, die zur Erledigung einer Aufgabe erforderlich ist. Da ein hier betrachtetes technisches System einen Fertigkeitenlevel nicht von sich heraus verändern kann, passt der Begriff für die Bezeichnung der Aktivitäten im Betrieb nicht. Fertigkeiten sind daher nach dem Verständnis des Autors der vorliegenden Arbeit eine Möglichkeit zur Modellierung von technischen Systemen, da sie die einzelnen Aktivitäten in einem System beschreiben können. Die Leistung einer Fertigkeit hängt von der eingesetzten Hardware und Software und von den Verfahren und Algorithmen ab. Diese werden einmalig durch die Entwickler festgelegt und umgesetzt und ändern sich im Betrieb nicht. Dadurch eignen sich Fertigkeiten nicht zur Beschreibung der aktuellen Leistungsfähigkeit eines technischen Systems.

Bergmiller (2014, Kapitel 8.2.1) verwendet den Begriff der Fertigkeit zur Beschreibung von Verhalten eines Fahrzeugs, das von extern beobachtet werden kann und zur Bewertung der Leistung dieses Verhaltens. Hier vermischt Bergmiller (2014) die Begriffe Fertigkeit und Fähigkeit und zieht keine klare Grenze zwischen beiden Begriffen. In einem technischen System können Aktivitäten sowohl Fertigkeiten als auch Fähigkeiten sein. Wie oben beschrieben, ändern sich Fertigkeitenlevel in einem hier betrachteten technischen System nicht. Somit kann die Argumentation von Bergmiller (2014) nicht übernommen werden. In der vorliegenden Arbeit wird daher von der Terminologie von Bergmiller (2014) abgewichen.

Aus den vorhergehenden Überlegungen ergibt sich die folgende Definition für eine Fertigkeit eines technischen Systems für die vorliegende Arbeit.

Definition (Fertigkeit eines technischen Systems)

Eine Fertigkeit beschreibt eine Aktivität, die ein technisches System zur Erledigung seiner Aufgabe ausführen muss.

Bergmiller (2014, Kapitel 8.2.1) schlägt vor, die Fertigkeiten, wie Siedersberger (2003, Kapitel 6) in die Kategorien Basis-, Aktions- und Verhaltensfertigkeiten zu teilen. Aus Sicht des Autors der vorliegenden Arbeit drängt diese Kategorisierung die Fertigkeiten zur Umfeldwahrnehmung in den Hintergrund. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit die Kategorien von Bagschik u. a. (2016) übernommen:

- Systemfertigkeiten: Diese sind übergeordnete Fertigkeiten, die nicht direkt die Ausprägung von Fahrentscheidungen betreffen, wie zum Beispiel Betriebszustandswechsel oder die Verfügbarkeit einer drahtlosen Kommunikation.
- Wahrnehmungsfertigkeiten: Diese sind Fertigkeiten, die entweder für die Wahrnehmung des Umfelds oder für die Selbstwahrnehmung erforderlich sind.
- Planungsfertigkeiten: Diese sind Fertigkeiten, die zur Planung von Fahrentscheidungen erforderlich sind.
- Aktionsfertigkeiten: Diese sind Fertigkeiten, die zur Ausführung von Fahrentscheidungen erforderlich sind.

In *Kapitel 6.5* wird eine Hierarchie von Fertigkeiten in einem Fertigkeitengraph für automatisierte Fahrzeuge vorgestellt.

Fähigkeit Eine Fähigkeit ist nach (Bergmiller, 2014, Kapitel 8.2.1) eine Voraussetzung zur Ausführung einer Fertigkeit. Fähigkeiten wären demnach Voraussetzungen, über die ein technisches System verfügt und die genutzt werden können, um Aktivitäten auszuführen. Ihre Leistungsfähigkeit kann sich während des Betriebs des Systems verändern. Somit ist für Fähigkeiten ein Qualitätsmaß möglich und sinnvoll, da von der Qualität der verfügbaren Fähigkeiten die Qualitäten der ausführbaren Aktivitäten betroffen sind. Daraus ergibt sich die Möglichkeit zur klaren Abgrenzung von Fertigkeiten und Fähigkeiten. Während des Betriebs ändert sich die Qualität der Fähigkeiten und sie haben Wechselwirkungen untereinander. Sie sind variabel verfügbar und bedingen sich gegenseitig durch ihren Fähigkeitslevel. Es bietet sich eine Differenzierung von Fertigkeiten und Fähigkeiten durch die unterschiedliche Verwendung der Begriffe an. Fertigkeiten beschreiben Aktivitäten und Fähigkeiten beschreiben die Qualität der Aktivitäten

Folgende Definition für die vorliegende Arbeit folgt aus den vorhergehenden Überlegungen.

Definition (Fähigkeit eines technischen Systems)

Eine Fähigkeit beschreibt die Qualität einer Aktivität, abhängig von systeminternen Eigenschaften und der aktuellen Situation.

In *Kapitel 10.5* werden die Fertigkeitengraphen daher in Fähigkeitengraphen überführt und zur Selbstrepräsentation im Betrieb verwendet.

3 Auswahl von Forschung und Technik zur funktionalen Entwicklung und zur Sicherheit von technischen Systemen¹

Sicherheit spielt in unterschiedlichen technischen Anwendungen eine große Rolle. Dazu gehören Fahrerassistenzsysteme genauso wie Systeme in der Robotik oder in der Luft- und Raumfahrt. Diese Forschungsgebiete haben zahlreiche Überschneidungen mit Fahrzeugführungssystemen. Daher folgt zunächst ein kurzer Überblick über die Forschung in der Robotik, im Bahnbereich, in der Luft- und Raumfahrt und in der Kraftwerkstechnik. Im Anschluss daran wird der Forschungsstand zur Sicherheit von elektronischen Fahrzeugsystemen betrachtet. Die vorgestellten Projekte und Verfahren wurden so ausgewählt, dass ein Bezug zu automatisierten Fahrzeugen hergestellt werden kann.

3.1 Robotik

In der Robotik werden derzeit viele neue Anwendungsfälle für automatisierte Systeme erforscht. Bisher lag ein Schwerpunkt auf der Fertigungstechnik, in der Roboter schon seit vielen Jahrzehnten präsent sind. In anderen Bereichen treten Roboter erst seit einigen Jahren in den öffentlichen Fokus. Dazu zählen Anwendungen in der Medizintechnik (Fischer und Voges, 2011), Alten- und Krankenpflege (Bubeck u. a., 2012) und der Servicerobotik (Albers u. a., 2006). Die Bestrebungen dieser Disziplinen zielen auf zwei Aufgabenbereiche ab. Einerseits sollen Menschen bei einfachen Tätigkeiten, wie zum Beispiel Transportaufgaben, entlastet werden. Andererseits gibt es Anwendungsfälle, bei denen Roboter Aufgaben qualitativ hochwertiger und/oder schneller als der Mensch erledigen können. In beiden Bereichen agieren diese Roboter direkt mit Menschen. Die Sicherheit spielt daher eine große Rolle, da Roboter, gleich welcher Art, das Potential besitzen, den Menschen Schaden zuzufügen.

Industrieroboter

Einen sehr umfangreichen Überblick über den Stand der Forschung im Robotikbereich aus dem Jahr 2008 bieten Siciliano und Khatib (2008). In ihrem *Springer Handbuch der Robotik* werden sehr viele unterschiedliche Robotersysteme beschrieben. Besonders zu erwähnen ist das Kapitel von Bicchi u. a. (2008). Dieses gibt einen Überblick über Sicherheitsaspekte bei Industrierobotern, die in der Regel nicht mobil sind. Hier werden vor allem zwei Gruppen von Robotern unterschieden. Zum einen Roboter in der Fertigung, die nicht direkt mit dem Menschen zusammen arbeiten. Von diesen geht aber dennoch bei der Programmierung, Inbetriebnahme, Reparatur und Wartung eine Gefahr aus. Viele Unfälle geschehen bei Industrierobotern nicht im Betrieb, sondern bei den Servicetätigkeiten (OSHA, 2006).

¹Teile dieses Kapitels wurden bereits in Reschka (2015) und Matthaei u. a. (2015) veröffentlicht. Die Beiträge des Autors der vorliegenden Arbeit in (Matthaei u. a., 2015) liegen in der Historie zum automatisierten Fahren, im Stand der Forschung zur Selbstrepräsentation und im Kapitel zur funktionalen Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen.

Die zweite Gruppe bilden Roboter, die direkt mit Menschen zusammen arbeiten, auch „Intelligente Assistenzgeräte“ genannt. Diese haben ein größeres Gefährdungspotenzial, da sie im Betrieb direkt mit Menschen interagieren. Für beide Arten von Industrierobotern sind diverse Sicherheitsmaßnahmen vorgesehen, die auch in der Norm DIN EN 10218 mit dem Titel „Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen“ gefordert werden (DIN 10218, 2012). Zu diesen gehören Not-Stopp-Schalter, Moment-Sensoren in den Gelenken und Überwachungseinrichtungen wie Lichtschranken und -vorhänge. Ein sicherer Zustand dieser Systeme wird meist durch ein Anhalten in der aktuellen Position erreicht. Je schneller dies geschieht, umso geringer ist das Verletzungsrisiko für den Menschen (Bicchi u. a., 2008). Die Anzahl der zu beachtenden Elemente des Umfelds und das Gefährdungspotenzial von Industrierobotern sind in der Regel begrenzt, da selten mehr als zwei Menschen gleichzeitig mit den Robotern in Kontakt kommen. Dennoch sind die eingesetzten Vorgehensweisen bei Design, Entwicklung und Test ähnlich zu denen der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen.

Mobile Roboter

Nicht nur stationäre oder sehr eingeschränkt bewegliche Roboter interagieren mehr und mehr direkt mit dem Menschen. Auch mobile Robotersysteme werden immer häufiger eingesetzt. Eine Zusammenfassung zu Sicherheitsaspekten mit einem Schwerpunkt auf mobilen Robotern geben Vasic und Billard (2013). Für mobile Roboter in dynamischen Umgebungen gibt es zahlreiche Einflussfaktoren auf den sicheren Betrieb. Die Dimensionen und die Masse eines mobilen Roboters spielen hier eine große Rolle, da ein relativ leichter und kleiner Roboter weniger Schaden anrichten kann, als beispielsweise ein automatisiertes Fahrzeug. Außerdem sollen diese Roboter die Aktion ausführen, die den geringsten Schaden anrichtet, falls es zu einer unvorhergesehenen Situation kommt.

Mobile Roboter können sich selbst und ihre Umgebung durch Kollisionen mit Objekten, Personen und weiteren Lebewesen und durch Übersehen von Absätzen, Abgründen, Stufen etc. gefährden (Albers u. a., 2006; Bubeck u. a., 2012; Fischer und Voges, 2011). Automatisierte Manipulatoren, die entweder stationär oder auf mobilen Plattformen eingesetzt werden, können Menschen gefährden, indem sie ihre Gelenke bewegen und mit den Menschen kollidieren oder durch die Werkzeuge, die sie einsetzen, verletzen. Sowohl für mobile Roboter als auch für Manipulatoren ist der sichere Zustand ein Stopp aller Manipulatoren in der aktuellen Position, beziehungsweise ein Anhalten (Bicchi u. a., 2008). In den meisten Fällen gilt: Je schneller dies geschieht, umso niedriger ist die Gefährdung, die von dem Roboter für seine Umwelt ausgeht. Ausnahmen sind Werkzeuge an den Manipulatoren, wie zum Beispiel Hände und Greifer, die einen Druck ausüben können. Ein Stopp dieser Hände oder Greifer könnte einen vorher bestehenden Druck erhalten, der zu Verletzungen und Beschädigungen führen kann.

Wichtige Maße bei der Bewegung mobiler Roboter und auch für automatisierte Fahrzeuge sind die so genannte *Zeit-bis-zur-Kollision* und die *Zeit-bis-zum-Bremsen-in-letzter-Sekunde*. Beide Werte können nur ermittelt werden, wenn der Roboter seine Umgebung und seine aktuelle Leistungsfähigkeit kennt (Vasic und Billard, 2013). Die Zeit-zur-Kollision gibt die Zeit an, bis es bei der aktuellen Bewegung eines Roboters zu einer Kollision mit einem statischen Hindernis oder einem anderen mobilen Objekt kommt. Die Zeit-bis-zum-Bremsen-in-letzter-Sekunde gibt die Zeit bis zum letzten Zeitpunkt an, an dem ein Bremsmanöver eine Kollision verhindern kann (Zhang u. a., 2006). Die Berechnung beider Maße zu den Objekten

im Umfeld eines Roboters und eines automatisierten Fahrzeugs erlaubt eine Prognose, ob und wann es zu Kollisionen kommen kann.

Auch Woodman u. a. (2012) befassen sich mit mobilen Robotern und kommen zu dem Schluss, dass die Sicherheitsaspekte bereits bei der Entwicklung eines Regelungssystems für einen Roboter berücksichtigt werden müssen. Außerdem erachten sie eine Trennung von Steuer- und Regelungssystem vom Sicherheitssystem für sinnvoll. Die vorgeschlagene Systemarchitektur von Woodman u. a. (2012) findet in einem mobilen Roboter Anwendung, der fahren kann und über weitere Aktoren, wie zum Beispiel einen Greifarm, verfügen kann. Die Sicherheitsschicht ist verantwortlich für einen funktional sicheren Betrieb und kann den funktionalen Betrieb beeinflussen.

Die sicheren Zustände des Roboters sind abhängig von den Funktionen, die ein Roboter erfüllen soll. Diese können sehr vielfältig sein und daher wird von Woodman u. a. (2010) und Woodman u. a. (2012) ein Regelsatz (safety policies, (Wörtliche Übersetzung: Sicherheitsregeln)) vorgeschlagen, der übergeordnete Regeln enthält, die einen sicheren Betrieb eines Roboters ermöglichen. Es ist vorstellbar, dass ein Roboter unerwartete Lösungswege für ein Problem abhängig von seiner Entscheidungsfreiheit und seinen Fertigkeiten findet und es dadurch zu gefährlichen Situationen kommen kann. Wie von Brooks (1986) beschrieben, kann dies bei der häufig angewendeten Subsumptionsarchitektur erfolgen. Übertragen auf automatisierte Fahrzeuge bedeutet dies, dass Fahrentscheidungen zwar nach verschiedenen Kriterien, wie zum Beispiel der Straßenverkehrsordnung, effizienter Fahrweise und Komfort, getroffen werden können, aber stets eine Kollisionsvermeidung aktiv ist, die als übergeordnete Instanz eingreifen kann.

Im Vergleich zu automatisierten Fahrzeugen sind die potentiellen Gefahren eines solchen Roboters jedoch geringer. Zu den größten Gefahren gehören Kollisionen mit Menschen und Objekten und die Beschädigung oder das Fallenlassen von Gegenständen, die getragen werden. Obwohl Sachschäden keine große Rolle spielen, so können dennoch Gefahren für Menschen durch die aktuelle Aufgabe des Roboters entstehen, beispielsweise das Verbrennen von Kleidung beim Bügeln und daraus resultierende Brände (Woodman u. a., 2010). Bei der Sicherheit automatisierter Fahrzeuge stehen die Passagiere und die anderen Verkehrsteilnehmer im Vordergrund. Natürlich ist es sinnvoll, auch Sachschäden zu vermeiden, dies sollte jedoch eine niedrigere Priorität haben.

Ähnlich wie bei Industrierobotern ist der Not-Stopp der Aktoren eine akzeptierte Lösung im Fehlerfall. Ein mobiler Roboter, beispielsweise ein Pflegeroboter, bleibt stehen und hält seine Aktoren in der aktuellen Position, so dass von ihm keine aktive Gefahr ausgeht. Für Pflegeroboter wurde daher die Norm ISO 13482:2014 *Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots* (Freie Übersetzung: Roboter und roboterähnliche Geräte - Sicherheitsanforderungen für Pflegeroboter) entwickelt (ISO 13482, 2014). Einen Überblick über die Geltungsbereiche und Besonderheiten dieser Norm im Vergleich zur Norm ISO 10218 für Industrieroboter gibt Jacobs (2012). In vielen Bereichen sind die genannten Normen ähnlich zur Norm ISO 26262, beispielsweise bei der Gefährdungsanalyse und der parallelen Entwicklung von funktionalen und sicherheitstechnischen Anforderungen (ISO 13482, 2014; DIN 10218, 2012; ISO 26262, 2011).

Selbstrepräsentation von Robotern

Für einen sicheren Betrieb von Robotern ist eine Selbstrepräsentation notwendig. Ein Roboter muss die Lage seiner Aktoren und seine eigene Leistungsfähigkeit kennen, damit er

keine gefährlichen Aktionen ausführt. Knoll und Christaller (2000) haben die Herausforderungen an die Selbstrepräsentation und Selbstwahrnehmung von Robotern im Jahr 2000 zusammengefasst. Der Fokus von Knoll und Christaller (2000) liegt auf mobilen Robotern und kann auf automatisierte Fahrzeuge übertragen werden. Eine vollständige Überwachung und Selbstrepräsentation ist erforderlich, um die von dem Roboter ausgehende Gefahr zu minimieren. Damit eine Selbstrepräsentation möglich wird, fordern Knoll und Christaller (2000) eine Selbstwahrnehmung des Roboters. Diese erfolgt durch zwei Arten von Sensorik:

„Mit der internen Sensorik (Propriozeptorik) werden die den inneren Roboterzustand betreffenden Parameter gemessen: Ort, Batteriezustand, Energieverbrauch. Daneben gibt es aber auch Sensoren, um Neigungen der Körperachse zu messen (Inklinometer), Orientierung (Kompaß oder Gyroskop), Stellungen von Gelenken (Winkelgeber oder Potentiometer) und Umdrehungszahlen von Achsen (insbesondere bei Radfahrzeugen).“

(Knoll und Christaller, 2000)

„Externe Sensorik (taktile, optisch im sichtbaren und unsichtbaren Bereich, akustisch) erfaßt die den Roboter umgebende Welt.“

(Knoll und Christaller, 2000)

Beide Arten von Sensorik werden auch in automatisierten Fahrzeugen eingesetzt. Die Messdaten der Sensoren stehen zur Selbstwahrnehmung zur Verfügung. Um daraus eine Selbstrepräsentation zu generieren, werden die Messdaten zur Bedatung von Modellen der Roboter eingesetzt (Knoll und Christaller, 2000).

Übertragen auf automatisierte Fahrzeuge werden Modelle benötigt, die eine interne Repräsentation des Fahrzeugs und eine Ableitung der aktuellen Fähigkeiten des Fahrzeugs ermöglichen. Fahrentscheidungen können nur dann zu sicherem Verhalten führen, wenn diese wie geplant ausgeführt werden können. Die Planung muss daher die eigenen aktuellen Fähigkeiten berücksichtigen.

3.2 Bahnen und Schienenfahrzeuge

Züge werden bereits seit einigen Jahrzehnten automatisch betrieben und falls ein Zugführer vorhanden ist, so hat er häufig eine überwachende Aufgabe (Yasunobu und Miyamoto, 1985). Im Gegensatz zu den hier betrachteten automatisierten Fahrzeugen werden Sicherheitsfunktionen in vielen Fällen von der Infrastruktur übernommen. Beispielsweise werden Gleisbelegungen in Steuerzentralen koordiniert und die überwachenden Komponenten sind in die Gleise integriert. Die Steuerungssysteme haben die Aufgabe, Streckenabschnitte immer nur mit einem Zug zu belegen, um Kollisionen zu vermeiden. Dies wird durch im Gleis verbaute Sensoren und Systeme (waysidecentric), wie zum Beispiel Achszähler am Eingang und am Ausgang eines Streckenabschnitts, realisiert (Pascoe und Eichorn, 2009). Ist ein Abschnitt belegt, so werden die Signale entsprechend geschaltet, um eine Einfahrt zu verhindern. Die Kollisionsvermeidung ist daher vorrangig ein logistisches Problem. Die fehlende Querführung bei Zügen und Bahnen reduziert die Anzahl der Handlungsoptionen auf die Längsführung. Vereinfacht gesagt kommt es nur darauf an, dass Züge auf freien Gleissegmenten mit angemessener Geschwindigkeit fahren, um Kollisionen und Entgleisen

zu verhindern. Eine Überwachung der Strecke vor dem Zug ist aufgrund der langen Anhaltewege nicht mit Umfeldsensorik möglich. Dennoch verfügen Züge und Bahnen über Nothaltefunktionen, die von den Passagieren und dem Zugführer an Bord und in fahrerlosen Bahnen auch extern ausgelöst werden können.

In fahrerlosen Zügen und Bahnen wird die Geschwindigkeit der Fahrt automatisch geregelt und neben der Überwachung der Gleisbelegung durch die Infrastruktur verfügen die Systeme auch über Onboard-Mechanismen (vehiclecentric). Die Kommunikation zwischen Steuerzentrale und Zug erfolgt über Funktechnologien, genauso wie die Kommunikation zwischen Bahnsteigen und fahrerlosen U-Bahnen. Dadurch kann eine redundante Türüberwachung am Bahnsteig und in der Bahn genutzt werden, um Gefährdungen durch sich schließende Türen zu verhindern. Das *Communication Based Train Control* (CBTC) (Deutsche Übersetzung: Kommunikationsbasierte Bahnsteuerung) hat sich zu einem Standard entwickelt, der in zahlreichen Bahnsystemen weltweit eingesetzt wird (Pascoe und Eichorn, 2009).

In der Nürnberger U-Bahn RUBIN² wird ein solches System zur automatisierten Zugführung eingesetzt (Automatic Guidance of Trains (ATG)). Auf den Bahnstrecken gibt es einen gemischten Verkehr von Bahnen mit und ohne Fahrer. Ein wesentlicher Bestandteil des Sicherheitskonzepts ist die Überwachung der Türen (Pascoe und Eichorn, 2009). Hier werden Komponenten der automatischen Zugschutzsysteme (Automatic Train Protection (ATP)) und des automatischen Zugbetriebs (Automatic Train Operation (ATO)) eingesetzt, die in stationäre und Onboard-Komponenten unterteilt werden. Mit ATP wird die Geschwindigkeit unterhalb existierender Begrenzungen gehalten und es werden Sicherheitsstopps und Nothalte ausgelöst. Das System muss daher die Anforderungen an das Sicherheitsintegritätslevel 4 (höchste Sicherheit) nach der Norm DIN EN ISO 50128 mit dem Titel „Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme“ erfüllen (DIN 50128, 2012). Die dafür notwendige Hardware und Software ist aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten von Bahnen im Vergleich zu Kraftfahrzeugen günstig und der verfügbare Raum zur Integration ist größer.

3.3 Luft- und Raumfahrt

In der Luft- und Raumfahrt werden seit einigen Jahrzehnten *fly-by-wire* Steuerungssysteme eingesetzt. Diese erlauben eine Steuerung der Aktoren ohne mechanische Verbindung. Bereits in den 1970er Jahren wurde ein solches System von Elliott (1973) vorgestellt. Bis heute werden fly-by-wire Systeme zur Steuerung von Flugzeugen und Raketen eingesetzt³. Es ist somit sowohl für den Piloten als auch für ein elektronisches Steuerungssystem, beispielsweise einen Autopilot, möglich die Aktoren anzusteuern. Realisiert wird fly-by-wire durch eine Reihe von redundanten Verbindungen zwischen Bedienelementen, Steuerungssystemen und Aktoren. Die Norm DO-178C (2011) für die Softwareentwicklung in Luftfahrtsystemen enthält Anforderungen an diese Systeme.

²RUBIN steht für „Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg“.

³Die beiden größten Hersteller von Passagierflugzeugen, Airbus und Boeing, setzen in ihren aktuellen Modellen auf fly-by-wire Technik. Siehe dazu <http://www.airbus.com/innovation/proven-concepts/in-design/fly-by-wire/>, abgerufen am 23.03.2016 und http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2011/september/i_bca03.pdf, abgerufen am 23.03.2016.

Autopilot

In Flugzeugen gibt es zahlreiche Überwachungs- und Kontrollfunktionen, die den Einsatz von Autopiloten erlauben. Zur Absicherung dieser befinden sich in Passagierflugzeugen immer mindestens ein, häufig sogar zwei Piloten an Bord, die zu jedem Zeitpunkt die Kontrolle über die Steuerung des Flugzeugs übernehmen können. Größere Passagierflugzeuge werden daher auch als *multi-pilot aircrafts* bezeichnet (EASA, 2013, Tab. 8). Diese Absicherung des Autopiloten durch den Menschen ist vergleichbar mit Fahrerassistenzsystemen, bei denen die Kontrolle im Fehlerfall ebenfalls an den Menschen übergeben wird und der Mensch das System permanent überwachen muss.

In Yeh (2013) wird ein dreifach-redundantes Steuerungssystem für ein Boeing 777 Passagierflugzeug vorgestellt. Jede sicherheitsrelevante Komponente des Flugzeugkontrollsystems wird auf mindestens drei unterschiedliche Arten redundant umgesetzt, um eine hohe Verfügbarkeit der Ansteuerung durch einen Piloten oder den Autopiloten zu realisieren.

Die in Flugzeugen eingesetzten Architekturmuster und auch die Hardware und Software zur Realisierung erscheinen auch für Fahrzeuge anwendbar. In Flugzeugen spielen die hohen Kosten solcher redundanten Systeme aufgrund der hohen Gesamtkosten des Flugzeugs selbst nur eine geringe Rolle. Für Fahrzeuge wären bei dreifacher Redundanz jedoch der dreifache Entwicklungsaufwand und die dreifache Hardware im Fahrzeug erforderlich.

Unbemannte Flugzeuge

Es gibt zwar auch unbemannte Flugzeuge (Drohnen), jedoch werden diese nach Kenntnisstand des Autors der vorliegenden Arbeit nicht zum Transport von Menschen eingesetzt. Bei einem schwerwiegenden Fehler eines unbemannten Flugzeugs oder eines Raumfahrzeugs wird das Risiko in Kauf genommen, dass dieses abstürzt. Im Vergleich zu automatisierten Fahrzeugen werden unbemannte Flugzeuge in einer einfacheren Umgebung betrieben, da es keine oder vernachlässigbar wenige andere Luftverkehrsteilnehmer gibt, die beachtet werden müssen. Auch die Missionen sind nicht so komplex, da die Flugroute anhand von Koordinaten vorgegeben wird. Dient eine Drohne beispielsweise der Überwachung, reicht es aus, wenn sie in der Lage ist, ein Ziel anzufliegen, die Mission zu erledigen und wieder zum Ausgangspunkt zurückzukehren.

Die Flugrouten werden durch eine zentrale Luftverkehrskontrolle vorgegeben und die Autopiloten halten die Flugzeuge auf den vorgegebenen Kursen. Daher lässt sich ein Autopilot im Flugzeug mit einem teilweise automatisierten Fahrerassistenzsystem vergleichen, da die Piloten die Aufgabe haben, das System zu überwachen. In unbemannten Flugzeugen entfällt diese Überwachung durch Piloten und die Anforderungen an das Flugzeugführungssystem steigen. Durch Flugrouten, die nur über dünnbesiedelte Gebiete gelegt werden, sollen Risiken reduziert werden. Da keine Personen an Bord sind, ist ein Absturz im freien Feld durchaus möglich, da niemand dabei verletzt wird (Korn u. a., 2012).

3.4 Kraftwerke

Kernkraftwerke gelten weithin als Risiko, da bei Störfällen hohe Schäden für die Umwelt entstehen können. Die dort eingesetzten Steuer- und Regelungssysteme müssen daher die höchsten Sicherheitsanforderungen erfüllen, um einen Betrieb auch nach Naturkatastrophen, terroristischen Anschlägen und internen technischen Fehlern zu ermöglichen. Da bei Kern-

kraftwerken eine sofortige Abschaltung nicht möglich ist, und die Brennelemente auch nach ihrem Einsatz im Reaktor weiterhin aktiv sind und gekühlt werden müssen, sind mehrfach redundante Systeme vor allem zur Kühlung vorgeschrieben (IAEA, 2012, Requirement 52).

Die Sicherheit eines Kernkraftwerks hängt maßgeblich davon ab, wie präzise und fehlerfrei die Steuerungs- und Kontrollsysteme spezifiziert und entwickelt werden. Die Einbeziehung der Menge der möglichen Situationen und Ereignisse spielt dabei eine wesentliche Rolle, da vor allem Kettenreaktionen und Mehrfachfehler zu einer Gefährdung führen können. Beispielsweise befand sich das Kernkraftwerk Fukushima Daiichi in Fukushima, Japan nach dem Tōhoku-Erdbeben 2011 in einem fail-safe Zustand und alle Sicherheitssysteme wurden automatisch korrekt aktiviert. Nach dem Auftreffen einer Tsunami-Welle wurden jedoch Teile der redundanten Sicherheitssysteme, vor allem der Notstromaggregate, beschädigt. Im Nachhinein betrachtet liegt der Fehler, der zu den dramatischen Konsequenzen für die gesamte Region geführt hat, nicht am Versagen der Sicherheitsfunktionen, sondern an der fehlerhaften Spezifikation. Die Dämme und Schutzmauern, die vor Flutwellen schützen sollten, waren zu niedrig geplant und das Kraftwerk stand zu niedrig und zu nah am Meer, um einen solchen Tsunami unbeschadet zu überstehen (WNA, 2014).

Für automatisierte Fahrzeuge lässt sich daraus folgern, dass die zahlreichen Ereignisse und Kombinationen von Ereignissen und Fehlerquellen bereits bei der Spezifikation berücksichtigt werden müssen. Hierfür ist eine Standardisierung für die Ermittlung der Anforderungen, vergleichbar mit Kernkraftwerken, notwendig. Bei deren Entwicklung spielt die Sicherheit bereits in der Designphase eine tragende Rolle und das Prinzip „Sicherheit durch Design“ (safety by design) ist in IAEA (2012) standardisiert.

3.5 Elektronische Fahrzeugsysteme

3.5.1 Fahrerassistenzsysteme

Im Bereich der Fahrerassistenz gab es in den letzten Jahrzehnten einige Entwicklungen, die den menschlichen Fahrer unterstützen und entlasten sollen. Die folgende Auswahl der Forschung und Technik berücksichtigt Ergebnisse, die auch im Hinblick auf automatisierte Fahrzeuge relevant sind.

Sicherheitskonzept für automatisierte Fahrerassistenzsysteme

Von Hörwick (2011) und Hörwick und Siedersberger (2010b) wird ein Sicherheitskonzept für teilautomatisierte und hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme vorgestellt. Jedoch werden die Begriffe abweichend zu der vorliegenden Arbeit verwendet. In Hörwick und Siedersberger (2010b) bedeutet Fully Automated DAS (FA-DAS) (im Englischen *driver assistance system*, abgekürzt: DAS) eigentlich teilweise automatisiert (Automatisierungsgrad 2), da der Fahrer die Quer- und die Längsführung überwachen muss. Autonomous DAS (A-DAS) in Hörwick und Siedersberger (2010b) ist gleichbedeutend mit bedingt automatisiert (Automatisierungsgrad 3), da der Fahrer nicht dauerhaft überwachen muss und das System selbständig einen sicheren Zustand erlangen kann.

Für das Sicherheitskonzept werden eine permanente Überwachung der Systemgrenzen und damit verbundene Aktionspläne gefordert, um ein Fahrerassistenzsystem in einen sicheren Zustand zu überführen:

„Thus the two primary tasks of the safety concept are the following [...]:

- permanent monitoring of system boundaries of the DAS during normal operation
- provision of action plans to transfer the DAS into a safe state, a so called ‘fallback layer’, in case of system boundary crossings“

(Hörwick und Siedersberger, 2010b)

Nach der Sichtweise von Hörwick und Siedersberger (2010b) kann ein automatisiertes Fahrzeug auch einen unsicheren Zustand erreichen. Ein unsicherer Zustand würde jedoch eine Gefährdung bedeuten und es besteht die Gefahr, dass das Fahrzeug außer Kontrolle gerät. Beides soll mit dem in *Kapitel 10* der vorliegenden Arbeit vorgestellten Sicherheitskonzept vermieden werden.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Sicherheit sind die von Hörwick und Siedersberger (2010a) vorgestellten Aktionspläne zur Erlangung eines sicheren Zustands für einen Stauassistenten der Audi AG. In diesen Aktionsplänen ist vorgesehen, dass sich das System im Fehlerfall nicht abschaltet, sondern zunächst eine Übergabe an den Fahrer versucht. Wenn dieser die Kontrolle nicht übernimmt, so stoppt das Fahrzeug automatisch. Der Nothalt wird hier als letzte Aktion angesehen, die zu einem sicheren Zustand des Fahrzeugs führen kann (Hörwick und Siedersberger, 2010a; Hörwick, 2011). In der funktionalen Architektur von Hörwick (2011, Seite 56) sind Funktionsgrenzenüberwacher integriert. Diese sollen die Übergabe an den Fahrer auslösen, falls das Fahrzeug seine funktionalen Grenzen erreicht. Da der Fokus auf einem System zur automatisierten Staufahrt auf der Autobahn (Stauassistent) bis maximal 60 km/h liegt, erscheint das Anhalten auf einem Fahrstreifen als sicherer Zustand, bis ein Mensch die Kontrolle übernimmt. Die relativen Geschwindigkeiten zu weiteren Verkehrsteilnehmern sollten aufgrund der Stausituation gering sein (Hörwick, 2011; Hörwick und Siedersberger, 2010b).

Hörwick (2011, Seite 32 und Seite 72) argumentiert, dass die Funktionsgrenzen aus der Spezifikation ermittelt werden müssen und es deshalb keinen generalisierten Ansatz für Fahrerassistenzsysteme und automatisierte Fahrzeuge geben kann, sondern nur eine funktionsspezifische Überwachung der Systemgrenzen. Das von Hörwick (2011) beschriebene Vorgehen erfordert jedoch ebenfalls eine vollständige Funktionsspezifikation. Nach Kenntnisstand des Autors der vorliegenden Arbeit kann es diese vollständige Spezifikation für ein automatisiertes Fahrzeug mit einer offenen Menge an möglichen Situationen nicht geben. Dies ist auch der Diskussionsstand in der Arbeitsgruppe Elektronische Fahrzeugsysteme am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig. Es ist offen, ob diese Herausforderung für den Stauassistenten gelöst werden kann.

Für automatisierte Fahrzeuge mit den Automatisierungsgraden 4 und 5 steht keine Übergabe an den Fahrer zur Verfügung, wodurch die Fahrerübergabe wie von Hörwick (2011) beschrieben, nicht funktioniert. Des Weiteren wird bei einer Erweiterung des Anwendungsfalls auch die Anzahl der Szenarien und somit der Situationen ansteigen. Die von Hörwick (2011, Kapitel 10) beschriebene Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle abseits des Staus ist nicht nachvollziehbar, da er argumentiert, dass der sichere Zustand immer der Stillstand im eigenen Fahrstreifen ist. Auf einer Autobahn mit sehr hohen Geschwindigkeiten ist dies nicht sicher. Wie es scheint, zielt Hörwick (2011) daher nicht auf einen sicheren, sondern einen risiko-minimalen Zustand ab. Dies ist nach Ansicht des Autors der vorliegenden Arbeit nicht ausreichend.

Eine Übertragbarkeit auf den städtischen Verkehr ist möglich, da der Stillstand aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten der weiteren Verkehrsteilnehmer sicher ist. Da sich die Funktionsgrenzüberwachung auf eine vollständige Spezifikation stützt, ist offen, ob das Konzept direkt übertragen werden kann. Dies hängt davon ab, ob das vollständig automatisierte Fahrzeug überhaupt Funktionsgrenzen in seiner Einsatzumgebung haben darf. Diese Frage kann in der vorliegenden Arbeit nicht beantwortet werden.

Notfallassistenzsysteme

Auch (Rauch u. a., 2012) kommen in einer Studie zum Potential der automatisierten Fahrt auf Autobahnen zu dem Schluss, dass der Stillstand auf einem Fahrstreifen kein sicherer Zustand ist. Die Studie entstand im Rahmen der Entwicklung eines Notfallassistenzsystems, das ein Fahrzeug sicher stoppen kann, falls der Fahrer das Bewusstsein verliert oder aus anderen Gründen nicht mehr zur Fahrzeugführung in der Lage ist (Kämpchen u. a., 2010; Rauch u. a., 2012). Auch von Mirwaldt u. a. (2012) wird ein solches System vorgestellt. Die Sicherheitsanforderungen sind hier höher als bei einem Stauassistenzsystem, da das Fahrzeug nicht einfach anhalten soll, sondern den fließenden Verkehr verlassen und auf dem Seitenstreifen stoppen soll. Außerdem ist das System auch für den normalen Autobahnverkehr und nicht nur für den Stau konzipiert, sodass es zu sehr hohen relativen Geschwindigkeiten kommen kann. Daraus ergeben sich sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Umfeldwahrnehmung, da andere Verkehrsteilnehmer bei den Fahrstreifenwechseln auf den Seitenstreifen beachtet werden müssen (Rauch u. a., 2012). Redundante Sensorik zumindest für den Bereich vor, hinter und bei Rechtsverkehr auch rechts neben dem Fahrzeug ist hier eine Mindestanforderung. Der Nutzen solcher Systeme ist dennoch vorhanden, auch wenn das System aufgrund technischer Probleme nicht voll einsatzfähig ist. Ein unkontrolliert fahrendes Fahrzeug auf der Autobahn ist gefährlicher als ein kontrolliert langsam fahrendes oder stehendes Fahrzeug, das durch geeignete Signalisierung auf sich aufmerksam machen kann - selbst wenn der Wechsel auf den Seitenstreifen nicht möglich ist (Kämpchen u. a., 2010; Mirwaldt u. a., 2012).

Temporärer Autopilot

Im Projekt HAVEit⁴ wurden verschiedene teil- und vollautomatisierte Fahrerassistenzsysteme entwickelt. Als Nachfolger des Projekts SPARC⁵ (Holzmann u. a., 2005) zielte es auf die Entwicklung eines neuen Konzepts für aktive Sicherheitssysteme für Lkw und Pkw ab. (Übersetzt aus dem Englischen: „...a new concept of active safety system for heavy goods vehicles and personal cars.“ (Holzmann u. a., 2005)). In einem der Teilprojekte wurde der sogenannte „Temporäre Autopilot“ (TAP) entwickelt. Dieses System hat einen teilautomatisierten Charakter, da der Fahrer das System stets überwachen muss. Die Besonderheit liegt darin, dass das System von 0-130 km/h aktiv ist und so die Fahrzeugführung auf Landstraßen und Autobahnen mit verfügbaren Fahrstreifenmarkierungen übernehmen kann (To und Bartels, 2010). Das System verfügt über eine Komponente, die den Fahrer überwacht. Falls dieser die Aufmerksamkeit vom Verkehrsgeschehen abwendet, wird eine Übernahmeaufforderung gestartet und der Fahrer muss die Kontrolle wieder übernehmen. Erfolgt die Übernahme

⁴HAVEit steht für „Highly automated vehicles for intelligent transport“ (Deutsche Übersetzung: Hochautomatisierte Fahrzeuge für den intelligenten Transport)

⁵SPARC steht für „Secured Propulsion using Advanced Redundant Control“ (Deutsche Übersetzung: Gesicherte Antriebssteuerung mit fortschrittlicher redundanter Steuerung)

nicht, bremst das Fahrzeug in den Stillstand ab (To und Bartels, 2010). Der sichere Zustand wird also einerseits durch die Übergabe an den Fahrer, andererseits durch den Stillstand im Fahrstreifen erreicht.

Tesla Autopilot

Der Tesla Autopilot ist eines der ersten teilautomatisierten Systeme, das auf den Markt gekommen ist. Der Fahrer aktiviert das System und das Fahrzeug folgt dem Fahrstreifen und hält Abstand zu weiteren Verkehrsteilnehmern bis zu einer vom Fahrer eingestellten Geschwindigkeit. Über den Hebel des Fahrtrichtungsanzeigers können Fahrstreifenwechsel ausgelöst werden⁶. Bei der Nutzung des Systems kann der Fahrer die Hände vom Lenkrad nehmen. Das System schaltet sich im Betrieb nicht von selbst ab. Ein Eingriff des Fahrers oder eine explizite Deaktivierung sind erforderlich. Dennoch wird das System als Assistenzsystem verstanden, da es nicht alle Situationen beherrscht und mitunter falsch handelt⁷. Das System wurde bei den Kunden mittels einer Softwareaktualisierung über Mobilfunk installiert. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass hier Software auf Steuergeräten im Fahrzeug verändert wurde, die potenziell sicherheitskritisch sind. Eine weitere Besonderheit ist das kontinuierliche Lernen des Systems. Die gesammelten Umfelddaten werden an Tesla übermittelt und genutzt, um das System über Softwareaktualisierungen automatisch zu verbessern. Diese Aktualisierungen scheinen erforderlich, da sich die Nutzer des Systems zu sehr auf das System verlassen und es zu gefährlichen Situationen kommen kann⁸.

Überwachung des Fahrers

Eine Abhilfe schaffen die Entwicklung und Erprobung von Überwachungssystemen der Aufmerksamkeit des Fahrers (Kopf, 2005). Wenn es möglich ist, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf den Straßenverkehr zu erhalten, obwohl dieser nicht aktiv in die Fahrzeugführung eingreift, so lässt sich die Fahraufgabe teilweise automatisieren. Durch die aufrecht erhaltene Aufmerksamkeit des Fahrers ist eine Deaktivierung des Fahrerassistenzsystems möglich, da der Fahrer die Fahraufgabe übernehmen kann. Dies ist jedoch auch nur begrenzt anzuwenden, da eine Übergabe in komplexen Situationen ohne Vorwarnung für den Fahrer unerwartet sein kann. Dieser könnte nicht in der Lage sein, korrekt zu handeln und kann daher das Fahrzeug nicht ohne Vorwarnzeit kontrollieren (Gasser u. a., 2012; Reichardt, 1998). Vor allem im städtischen Straßenverkehr sind solche Situationen vorstellbar.

Vorwarnzeit zur Übergabe an den Fahrer

Die Länge einer sinnvollen Vorwarnzeit vor der Übernahme ist derzeit noch Gegenstand der Forschung (Gasser u. a., 2012; Damböck, 2013). Es ist dafür notwendig, entweder einen Notbetrieb in einem Fehlerzustand zu erzwingen oder Fehler zu erkennen, bevor diese zu einer Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Systems führen. Wie Damböck (2013) herausstellt, spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle bei der Übernahme der Fahraufgabe. Das

⁶Blog-Eintrag von Tesla Motors vom 14. Oktober 2015 (https://www.teslamotors.com/de_DE/blog/your-autopilot-has-arrived, abgerufen am 03.04.2016)

⁷Presseartikel „Einfach mal loslassen“ der Süddeutschen Zeitung vom 06. November 2015 (<http://www.sueddeutsche.de/auto/autopilot-im-tesla-model-s-einfach-mal-loslassen-1.2723051>, abgerufen am 23.03.2016)

⁸Pressemeldung „Elon Musk had a killer quote about the new feature coming to Teslas“ von techinsider.io vom 15. Oktober 2015 (<http://www.techinsider.io/elon-musk-explains-tesla-autopilot-2015-10>, abgerufen am 23.03.2016)

Ergebnis der in Damböck (2013) vorgestellten Untersuchung der Übernahme in verschiedenen Situationen zeigt, dass eine sichere Übernahme innerhalb von 8 Sekunden erfolgen kann (Damböck, 2013, Kapitel 7.2).

In der aktuellen S-Klasse von Mercedes-Benz wird das „DISTRONIC PLUS mit Lenk-Assistent und Stop&Go Pilot“ genannte System angeboten, welches den Fahrer sowohl bei der Längsführung als auch bei der Querführung des Fahrzeugs unterstützt (Schopper u. a., 2013). Der Fahrer muss jedoch weiterhin dem Verkehrsgeschehen folgen und die Querführung deaktiviert sich, falls der Fahrer die Hände vom Lenkrad nimmt.

„Erkennt der Lenk-Assistent mit Stop&Go Pilot, dass der Fahrer während der Fahrt die Hände vom Lenkrad nimmt, wird der Fahrer intelligent in Abhängigkeit von der Fahrsituation, des Handmomentensensors, der erfassten Umgebung und der Geschwindigkeit optisch im Kombiinstrument gewarnt. Reagiert der Fahrer nicht, ertönt ein Warnton und die Querführung wird deaktiviert.“

(Schopper u. a., 2013, Seite 108)

Durch diese Eigenschaft ist das System als teilweise automatisiert einzustufen. Die Längsführung kann sich ebenfalls beenden und bei geeigneter Signalisierung an den Fahrer übergeben, sobald es zu technischen Störungen kommt oder je nach Auslegung des Systems Systemgrenzen wie eine minimale Geschwindigkeit unterschritten werden (Winner und Schopper, 2015).

Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs

Im Projekt RESPONSE 3 wurde ein Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von künftigen Fahrerassistenzsystemen (ADAS) entwickelt, der Methoden und Werkzeuge für die Spezifikation und Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen beinhaltet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Kontrollierbarkeit der Situation durch den Fahrer. Durch eine Gefährdungs- und Risikoanalyse im Rahmen der Spezifikation des Funktionsumfangs werden die Anforderungen an die Übergabe und Übernahme der Kontrolle zwischen Fahrer und Fahrerassistenzsystem ermittelt (Response, 2009). Der sichere Zustand soll durch eine kontrollierte Übergabe an den Fahrer erreicht werden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich für Fahrerassistenzsysteme sagen, dass aufgrund der Verfügbarkeit eines Fahrers im Fahrzeug, ein sicherer Zustand entweder mit der Übergabe an diesen oder mit dem Bremsen in den Stillstand erreicht werden kann. Wie bei dem vorgestellten Notfallassistenzsystem kann zwar versucht werden, den Seitenstreifen zu erreichen, jedoch sind die Anforderungen hierfür sehr hoch. Auch bei höher automatisierten Systemen stellen die Übergabe an einen möglichen Verfügbarkeitsfahrer und die Abbremsung in den Stillstand mögliche Aktionen zur Erhaltung und Erlangung eines sicheren Zustands dar - nicht jedoch für die Automatisierungsgrade 4 und 5.

3.5.2 By-wire-Systeme

Systeme für drive-by-wire, steer-by-wire und brake-by-wire sind bereits in Serie oder könnten zukünftig in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden, da diese sowohl leichter als auch platzsparender sind. Die technische Realisierung dieser Systeme muss fehlertolerant sein. Die von Isermann (2006, Teil IV) beschriebene Vorgehensweise zur fehlertoleranten Entwicklung von

Sensoren, Steuerungssystemen und Aktoren in By-wire-Systemen wird bei heutigen Fahrerassistenzsystemen, wie zum Beispiel dem Antiblockiersystem oder der Fahrdynamikregelung, umgesetzt.

Drive-by-wire, das elektronische Gaspedal, ist seit einigen Jahren in vielen Fahrzeugen in Serie.

Das erste steer-by-wire, also Lenken ohne permanente mechanische Verbindung, wurde 2014 vom Hersteller Nissan eingeführt. Das System verfügt jedoch über eine Kupplung, die im Notfall eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rädern herstellt⁹. Diese mechanische Verbindung dient als Rückfallebene, falls das elektrische/elektronische System ausfällt. Der Fahrer kann das Fahrzeug dadurch auch ohne Elektronik kontrollieren.

Ein brake-by-wire-System, also ein Bremssystem ganz ohne energetischen Beitrag des Fahrers zur Bremsbetätigung gibt es beispielsweise seit 2002 in Serienfahrzeugen der Daimler AG. Das *Sensotronic Brake Control* genannte System kommt im normalen Betrieb ohne mechanische Verbindung aus und nur im Fehlerfall wird eine hydraulische Verbindung zwischen dem Bremspedal und den Vorderradbremzen hergestellt¹⁰.

By-wire-Systeme haben hohe Anforderungen an die funktionale Sicherheit. Daher eignen sich die Vorgehensweise und die eingesetzten Techniken bei der Absicherung dieser Systeme auch in gewissem Rahmen für die Steuerungs- und Regelungssysteme in automatisierten Fahrzeugen. Solange der Fahrer die Fahraufgabe zumindest teilweise übernimmt, macht eine mechanische Verbindung von Bedienelementen zu Aktoren auch weiterhin Sinn. Bei automatisierten Fahrzeugen reicht jedoch eine rein elektronische Ansteuerung ohne Bedienelemente für den Fahrer.

Die Aktorik muss mehrfach redundant angesteuert werden, wie es beispielsweise in Flugzeugen erfolgt (Bergmiller, 2014, Seite 44). Sowohl die Kommunikationssysteme zwischen Bedienelementen, Steuergeräten und Aktuatoren als auch die Bedienelemente, Steuergeräte und Aktoren werden hier mehrfach verbaut, sodass im Fehlerfall auf die redundanten Systeme zurückgegriffen werden kann (Bergmiller, 2014, Seite 44).

3.5.3 Fahrzeugführungssysteme

In diesem Kapitel werden Forschungsaktivitäten zu Fahrzeugführungssystemen zusammengefasst, die einen vollständig automatisierten Betrieb eines Fahrzeugs als Ziel haben.

3.5.3.1 Auswahl von Meilensteinen zur Automatisierung von Fahrzeugen

Die Projekte von den 1950er bis in die 1990er Jahre fokussierten sich nur auf die funktionalen Aspekte der maschinellen Fahrzeugführung. So zum Beispiel die ersten Ansätze zur Verknüpfung von Infrastruktur und Fahrzeug in den General Motors Research Labs, bei denen Magnete in die Fahrbahn eingelassen wurden, die dann vom Fahrzeug erfasst werden konnten. Der Fahrer musste dabei ständig auf den Verkehr achten und das System überwachen (Fenton, 1970). Auf europäischer Seite sind die Ergebnisse der Universität der Bundeswehr mit dem Versuchsträger VaMoRs hervorzuheben. Der Versuchsträger wurde im Jahr 1986 fertiggestellt und auf einer Teststrecke eingesetzt. Das Fahrzeug war in der Lage mittels bildgebender Kameras den Fahrstreifenverlauf wahrzunehmen. 1987 wurde der

⁹Pressemeldung der NISSAN CENTER EUROPE GmbH vom 19. Oktober 2012 (<http://www.newsroom.nissan-europe.com/de/de-de/Media/Media.aspx?mediaid=97910>, abgerufen am 08.03.2013)

¹⁰Pressemeldung der Daimler AG vom 31. Juli 2001 (<http://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/9905323>, abgerufen am 31.07.2016)

Versuchsträger auf einem abgesperrten Autobahnteilstück mit einer Geschwindigkeit bis zu 90 km/h eingesetzt (Dickmanns, 2015, 2007).

Im Rahmen des Projekts PROMETHEUS (PROgramMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety, 1987-1994) forschten zahlreiche europäische Unternehmen und Institutionen an Fahrerassistenz- und Fahrzeugführungssystemen. So auch die Universität der Bundeswehr, dieses Mal in Kooperation mit der Daimler AG. Mit dem Fahrzeug VaMoRs-P (VaMP) der Universität der Bundeswehr wurde ab 1994 automatisiertes Fahren auf öffentlichen Autobahnen in Frankreich demonstriert (Dickmanns, 2015; Maurer, 2015b, 2000; Dickmanns u. a., 1994). Auch die Fahrzeuge VITA und VITA II der Daimler AG verfügten über einen ähnlichen Funktionsumfang (Ulmer, 1994, 1992). Hervorzuheben ist eine Versuchsfahrt der Universität der Bundeswehr von Neubiberg nach Odense und zurück mit dem Versuchsträger VaMoRs-P im Jahr 1995. Bei dieser Fahrt wurde ein Großteil des Hin- und Rückwegs automatisiert mit maschinell durchgeführter Längs- und Querführung absolviert und vom Fahrer überwacht. Es wurden Geschwindigkeiten bis 180 km/h erreicht. Zusätzlich wurden automatische Fahrstreifenwechsel vom Fahrer ausgelöst (Maurer, 2000, 2015b). Maurer (2000, Kapitel 1.1.2) stellt heraus, dass eine Überwachung der Leistungsfähigkeit für eine Automatisierung von Fahrzeugen erforderlich ist. Diese wird in *Kapitel 6.5* detaillierter betrachtet.

In Japan wurde in den 1980er Jahren die Fahrzeugautomatisierung durch Erkennung von Fahrstreifen mit bildgebenden Kameras erforscht. Auch hier wurde das System dauerhaft vom Fahrer überwacht (Tsugawa, 1994). Gleiches gilt für die beeindruckenden Resultate in den 1990er Jahren, beispielsweise bei der Demonstration *No hands across america* 1995 der Carnegie Mellon University (Thorpe u. a., 2007; Shladover, 2007). Hier wurde nur die Querführung maschinell durchgeführt. Mit dem Versuchsträger ARGO des VisLab-Instituts der Università degli Studi di Parma erfolgten ebenfalls Langstreckenfahrten im Jahr 1998. Die Automatisierung deckte neben der Längs- und Querführung auch Fahrstreifenwechsel ab, die vom Sicherheitsfahrer ausgelöst wurden (Broggi u. a., 1999).

Alle bisher genannten Projekte sind als teilweise automatisiert (Automatisierungsgrad 2) einzuordnen. Der sichere Zustand wurde durch eine Übergabe an den Sicherheitsfahrer erreicht, beziehungsweise durch einen Eingriff des Sicherheitsfahrers in die Fahrzeugführung. Einen ausführlicheren Einblick in die Entwicklungen in den 1990er Jahren gibt Dickmanns (2002) mit einem Fokus auf kamerabasierter Bildverarbeitung.

Im Projekt *Autonomes Fahren* in Niedersachsen wurde 1998 ebenfalls an der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge geforscht. Von Binfet-Kull u. a. (1998) wird ein Sicherheitskonzept beschrieben, das verschiedene Methoden enthält, die auch für heutige Systeme denkbar und sinnvoll sind. Binfet-Kull u. a. (1998) beschreiben Aktionen, die zur Erlangung eines sicheren Zustands ausgeführt werden können. Sie differenzieren zwischen einer Rückkehr zur Wartungsstation, Anhalten auf dem nächsten verfügbaren Parkplatz, Sofortiges Anhalten am Straßenrand, Sofortiges Anhalten an Ort und Stelle und Vollbremsung an Ort und Stelle (Binfet-Kull u. a., 1998). Diese Aktionen sind auch für Systeme mit Automatisierungsgrad 3, 4 und 5 möglich.

In Binfet-Kull u. a. (1998) wurde nach dem Leitsatz *Sicherheit vor Verfügbarkeit* (Safety before Availability) vorgegangen. Als Maßstab für die Sicherheit für das automatisierte Fahrzeug wurden die Fähigkeiten des gewöhnlichen (conventional) menschlichen Fahrers herangezogen. Das automatisierte Fahrzeug sollte 100-mal sicherer als der Mensch sein.

„A vehicle, which is able to drive without human intervention (autonomous) by use of electronic equipment, shall not entail a hazard to human beings and/or property which is greater than the hazard represented by the conventional (human) driver!

Furthermore, the requirement is defined, that the machine has to be 10^{-2} times safer than the human being.“

(Binfet-Kull u. a., 1998, Seite 470)

Mit 10^{-2} ist die Häufigkeit von Fehlern pro Betriebsstunde gemeint und bedeutet, dass das System 100-mal weniger Fehler pro Betriebsstunde haben darf.

Wie die Sicherheit des gewöhnlichen menschlichen Fahrers gemessen wird, wurde in diesem Projekt jedoch nicht näher erläutert und nach Kenntnis des Autors der vorliegenden Arbeit existiert auch heute noch kein allgemein akzeptiertes Maß dafür.

3.5.3.2 DARPA Urban Challenge und nachfolgende Projekte

Seit Mitte der 1970er Jahre gibt es Forschungsprojekte mit dem Ziel einer vollständig automatisierten Fahrzeugführung (Maurer, 2000, Kapitel 2). Die Anzahl dieser Projekte hat stetig zugenommen und ein Höhepunkt kann in den drei Wettbewerben der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)¹¹ 2004, 2005 und 2007 in den USA gesehen werden. Besonders die DARPA Urban Challenge 2007¹² gab der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge für städtische Umgebungen einen Schub, da es dort um automatisiertes Fahren in einer stadähnlichen Umgebung mit annähernd echtem Verkehr ging. Das CarOLO-Team der Technischen Universität Braunschweig zeigte neben vielen weiteren Teams, dass automatisiertes Fahren möglich ist (Rauskolb u. a., 2008). Die Bedingungen waren jedoch nur stadähnlich und die anderen Verkehrsteilnehmer waren entweder automatisierte Fahrzeuge oder durch Stuntfahrer gelenkte Pkw. Außerdem war eine Vorrichtung vorgeschrieben, mit der die automatisierten Fahrzeuge von außerhalb über Funk gestoppt werden konnten (Wille, 2012).

In der DARPA Urban Challenge wurden alle teilnehmenden automatisierten Fahrzeuge ohne Fahrer an Bord auf einem abgesperrten Militärstützpunkt betrieben. Das Sicherheitskonzept wurde von der DARPA vorgegeben und beinhaltete eine Möglichkeit zum sofortigen Anhalten der Fahrzeuge über eine Fernsteuerung und über Notausschalter außen an den Fahrzeugen (Basarke u. a., 2007). Das Sicherheitskonzept des Teams CarOLO nutzte die Zeit nach dem Nothalt, um Aktionen der Selbstheilung durchzuführen. Dadurch war das automatisierte Fahrzeug in der Lage, fehlerhafte Komponenten des Fahrzeugführungssystems neu zu starten (Basarke u. a., 2007). Ähnlich sind auch die anderen Teams im Finale der Urban Challenge vorgegangen (Singh, 2008a,b,c).

Der Nothalt über eine Fernsteuerung als letzte Aktion zur Erreichung eines sicheren Zustands war nur möglich, weil die Fahrzeuge auf einem abgesperrten Gebiet fuhren, von überwachenden Fahrzeugen verfolgt wurden und die anderen Verkehrsteilnehmer entweder von professionellen Fahrern geführte Fahrzeuge oder automatisierte Fahrzeuge waren. Im

¹¹Homepage der DARPA: <http://www.darpa.mil/>, abgerufen am 23.03.2016

¹²Homepage der Darpa Urban Challenge 2007: <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/>, abgerufen am 23.03.2016

öffentlichen Straßenverkehr wäre eine Fahrt mit den Leistungsfähigkeiten der Versuchsträger wahrscheinlich zu gefährlich gewesen.

Stanford University

Mit dem automatisierten Versuchsträger Junior 3 demonstrierten die Stanford University und das Volkswagen Electronic Research Lab 2010 automatisiertes Fahren (Levinson u. a., 2011; Stanek u. a., 2010). Der Aufbau des Versuchsträgers ist dem Versuchsträger Leonie aus dem Projekt Stadtpilot ähnlich. Die Aktivierung von automatisierten Fahrfunktionen wird über so genannte *silver switches* gesteuert. Diese ermöglichen eine Verbindung zwischen dem Fahrzeugführungssystem und der Aktorik des Fahrzeugs. Im fail-safe Zustand sind diese Schalter geöffnet und es besteht keine Verbindung zwischen Fahrzeugführungssystem und Fahrzeug. Dadurch liegt die Kontrolle beim notwendigen Sicherheitsfahrer. Eine Besonderheit ist die Valet-Parking Funktion des Fahrzeugs, die auf einem abgesperrten Gelände auch ohne Sicherheitsfahrer genutzt werden kann. Zur Sicherheit verfügt das Fahrzeug über eine *e-stop* genannte Funktion, die in ähnlicher Weise auch in der DARPA Urban Challenge genutzt wurde. Die Überwachung des Systems wird mit einem *Health Monitor* (Freie Übersetzung: System-Gesundheits-Überwacher) realisiert, der Fehlfunktionen von Softwaremodulen erkennt und Funktionen zur Selbstheilung auslöst. Außerdem ist das Fahrzeug selbständig in der Lage, im Notfall die Bremsen zu betätigen und anzuhalten. Das stehende Fahrzeug ist somit der sichere Zustand, der über den e-stop und durch das Sicherheitssystem erreicht wird.

Carnegie Mellon University

An der Carnegie Mellon University wurde nach der DARPA Urban Challenge weiter am Versuchsträger *Boss* gearbeitet und ein Ansatz zur Überwachung und Rekonfiguration in Echtzeit entwickelt und veröffentlicht (Kim u. a., 2013). Dieser SAFER¹³ genannte Ansatz nutzt redundante Softwarekomponenten, die sich im Normalbetrieb im Standby befinden und bei Bedarf aktiviert werden können. Dadurch ist es möglich innerhalb kürzester Zeit von einer defekten Komponente auf eine redundante Lösung umzuschalten. Da keine Hardwareüberwachung stattfindet, werden auch keine Sensoren und Aktuatoren überwacht, wodurch der Ansatz als Ergänzung zu Methoden der Hardwareredundanz zu nutzen ist.

Karlsruher Institut für Technologie

Am Karlsruher Institut für Technologie wurde ebenfalls ein Versuchsträger entwickelt, der an der DARPA Urban Challenge teilgenommen hat. Das Team gewann mit diesem Versuchsträger die Grand Cooperative Driving Challenge 2011, bei der es um kooperierendes Fahren in heterogenen Umgebungen ging. Auch hier waren Sicherheitsfahrer an Bord (Geiger u. a., 2012).

Freie Universität Berlin

An der Freien Universität Berlin wurde der Versuchsträger *MadeInGermany* aufgebaut. Das Fahrzeug zeigt in medienwirksamen Demonstrationen zukünftige Anwendungsfälle von

¹³SAFER steht für System-level Architecture for Failure Evasion in Real-time applications (Freie Übersetzung: Systemarchitektur mit Fehlerkompensation für Echtzeitanwendungen)

automatisierten Fahrzeugen als Taxi¹⁴ und im öffentlichen Straßenverkehr in Berlin (Göhring, 2012; Schnürmacher u. a., 2013).

3.5.3.3 Weitere Projekte

Das Thema automatisiertes Fahren ist durch die DARPA Urban Challenge auch in die Öffentlichkeit gerückt und viele Automobilhersteller und -zulieferer arbeiten an (Teil-)Systemen für automatisierte Fahrzeuge¹⁵.

In den folgenden Projekten steht das vollständig automatisierte Fahren auf allen Straßenarten und in allen Umgebungen im Fokus. Die entwickelten Technologien sollen die Fahrzeugführung vollständig übernehmen können und den Menschen als Überwacher nicht mehr benötigen. Über die Sicherheitsfunktionen und -konzepte der verschiedenen Projekte gibt es nur wenige Veröffentlichungen. Dies kann unter anderem daran liegen, dass es möglich ist, den Fahrer weiterhin als Überwacher einzusetzen und daher keine umfangreichen Sicherheitssysteme zu nutzen oder auch, dass der Sicherheit der Systeme für den fahrerlosen Betrieb bisher keine übermäßige Aufmerksamkeit zukommt.

Universität der Bundeswehr München

An der Universität der Bundeswehr wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereich 28 der Deutschen Forschungsgemeinschaft und daran anschließender Forschungsaktivitäten an verschiedenen Sicherheitsfunktionen geforscht. Von Goebel u. a. (2008) wird der Versuchsträger MUCCI (MUnich's Cognitive Car Innovation) beschrieben, der für den Einsatz auf Autobahnen und Landstraßen entwickelt wurde. Auch in diesem Fahrzeug ist ein Sicherheitsfahrer erforderlich. Ähnlich dem Stauassistenten in Hörwick (2011) ist das Fahrzeug in der Lage, falls der Sicherheitsfahrer nicht übernimmt, einen sicheren Zustand durch Anhalten zu erreichen (Goebel u. a., 2008). Zusätzlich verfügt das Fahrzeugführungssystem über eine Verifikationseinheit, die verhindern soll, dass es zu einer Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern kommen kann. Dazu werden so genannte Erreichbarkeitsmengen (reachable sets) für jedes dynamische Objekt im Erfassungsbereich der Umfeldwahrnehmung berechnet. Liegt nun eine geplante Trajektorie so, dass sich die Erreichbarkeitsmenge des automatisierten Fahrzeugs und eines anderen Fahrzeugs überschneiden, ist eine Kollision möglich und die Trajektorie wird als unsicher bewertet (Goebel u. a., 2008).

Ein solcher Ansatz entspricht auch dem Leitmotto *Sicherheit vor Verfügbarkeit* in Binfet-Kull u. a. (1998), da nur solche Trajektorien gefahren werden, die einem gewissen Grad an Sicherheit genügen. Der sichere Zustand während der Fahrt ist also auch für die Planung der Trajektorien gegeben, da das Fahrzeug nur solche Trajektorien fährt, die kollisionsfrei absolviert werden können.

Università degli Studi di Parma

Eine besonders lange Strecke wurde im VIAC¹⁶ Experiment des VisLab der Universität Parma gefahren. Über 13.000 Kilometer legten mehrere Kleinbusse von Parma nach Shanghai automatisch zurück. Auch hier wurde ein Sicherheitsfahrer eingesetzt, der die Kontrolle

¹⁴Videodemonstration der Freien Universität Berlin vom 12. Oktober 2010 (http://www.youtube.com/watch?v=Kyk1VLtSH_U&fmt=37, abgerufen am 23.03.2016)

¹⁵Zum Beispiel: Pressemeldung der Robert Bosch GmbH vom 09. Januar 2013 (<http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6071&locale=de>, abgerufen am 23.03.2016)

¹⁶VIAC steht für VisLab Intercontinental Autonomous Challenge (Freie Übersetzung: Interkontinentale Herausforderung für autonome Fahrzeuge des VisLab)

über das Fahrzeug jederzeit erlangen konnte (Bertozzi u. a., 2013, 2011). Vier Fahrzeuge machten sich im Konvoi auf den Weg. Jeweils eines wurde als Führungsfahrzeug eingesetzt und ein zweites folgte diesem automatisch. Ein menschlicher Fahrer überwachte den Betrieb des ersten Fahrzeugs. Der zurückgelegte Weg des ersten Fahrzeugs wurde als GPS-Pfad¹⁷ aufgezeichnet und an das Folgefahrzeug übertragen. Dieses folgte automatisch ohne Fahrer, war jedoch mit einer Fernsteuerung ausgestattet, sodass es über Funk gestoppt werden konnte (Grisleri und Fedriga, 2010; Broggi u. a., 2013). Ein weiteres Projekt vom gleichen Institut zeigte 2012 mit dem Versuchsträger BRAiVE¹⁸ teilautomatisiertes Fahren im öffentlichen Straßenverkehr auf einer teilweise gesperrten Strecke. Auf Teilstücken der Strecke war kein Fahrer auf dem Fahrersitz, und nur der Beifahrer konnte über einen Not-Aus-Schalter in die Fahrzeugführung eingreifen. Außerdem war die gleiche e-stop Funktionalität wie bei VIAC integriert (Bertozzi u. a., 2013; Grisleri und Fedriga, 2010).

Stanford University

Zur Entwicklung von hochdynamischen automatisierten Fahrzeugen hat das Dynamic Design Lab der Universität Stanford einen Audi TTS mit entsprechender Technik ausgestattet. Das Fahrzeug ist in der Lage, einem Kurs mit hohen Geschwindigkeiten zu folgen. Dafür wird eine hochgenaue GPS-Ortung verwendet, die das Folgen eines vor der Fahrt festgelegten Kurses ermöglicht¹⁹. Das Fahrzeug verfügt außerdem über ein Regelungssystem, das ein Fahren nahe an den Grenzen der Fahrphysik möglich macht (Funke u. a., 2012; Kritayakirana und Gerdes, 2012). Dies wurde auf der Rallye-Strecke *Pikes Peak*²⁰ und der Rennstrecke *Thunderhill Raceway*²¹ nachgewiesen. Dieses Fahren am physikalischen Limit hat für die Sicherheit automatisierter Fahrzeuge insofern eine Bedeutung, als dass die entwickelten Verfahren dazu beitragen können, dass ein automatisiertes Fahrzeug auch in seltenen, fahrdynamisch anspruchsvollen Situationen sicher geführt werden kann.

BMW AG

Die BMW AG hat ein Assistenzsystem vorgestellt, das automatisiert auf einer Autobahn fahren kann. Es ist in der Lage, das Rechtsfahrgebot einzuhalten und langsamere Fahrzeuge links zu überholen. Der Fahrer führt auch hier eine Überwachungsaufgabe für das System aus und kann die Kontrolle jederzeit übernehmen (Ardelt u. a., 2012). Das Fahrzeug ist mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, die den Bereich um das Fahrzeug vollständig abdecken. Daher erscheint die in das Fahrzeug integrierte Technik leistungsfähig genug, um damit auch auf Landstraßen oder sogar in der Stadt automatisiert zu fahren.

Die von Ardelt u. a. (2012) vorgestellte Technik entwickelte sich aus dem Projekt „Smart Senior“, bei dem ein Fahrzeug automatisiert auf den Standstreifen einer Autobahn wechseln konnte, falls der Fahrer aus gesundheitlichen Gründen nicht mehr in der Lage sein sollte, das Fahrzeug zu führen (Aeberhard und Kämpchen, 2011).

¹⁷GPS steht für Global Positioning System (Freie Übersetzung: Globales System zur Positionierung)

¹⁸BRAiVE steht für BRAin-drIVE (Eine Übersetzung hierzu konnte nicht gefunden werden.)

¹⁹TEDtalk von Prof. J. Chris Gerdes, Mai 2012 (http://www.ted.com/talks/chris_gerdes_the_future_race_car_150mph_and_no_driver.html, abgerufen am 23.03.2016)

²⁰Pressemeldung der Universität Stanford vom 3. Februar 2010 (<http://news.stanford.edu/news/2010/february1/shelley-pikes-peak-020310.html>, abgerufen am 23.03.2016)

²¹Pressemeldung der Universität Stanford vom 13. August 2012 (<http://news.stanford.edu/news/2012/august/shelley-autonomous-car-081312.html>, abgerufen am 23.03.2016)

Bertha-Benz-Fahrt

2013 haben das Karlsruher Institut für Technologie und Mercedes-Benz eine teilweise automatisierte Fahrt auf der historischen Bertha-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim gezeigt (Ziegler u. a., 2014). Die Fahrt führte über Land- und Stadtstraßen und es wurden Engstellen durchfahren, Kreisverkehre durchfahren und Personen an Fußgängerüberwegen berücksichtigt. Die Fahrfunktion basierte auf einer hochgenauen digitalen Karte, die speziell für diese Fahrt angefertigt wurde. Eine Besonderheit bestand in der eingesetzten seriennahen Technologie des Versuchsträgers. Auch bei dieser Demonstration war ein Sicherheitsfahrer mit der permanenten Überwachung des Umfelds und des Fahrzeugs betraut (Ziegler u. a., 2014).

Audi Racepilot

Der 2014 vorgestellte Audi RS7 piloted driving concept²² fuhr teilweise automatisiert auf dem Hockenheimring mit sehr hohen Geschwindigkeiten. Das Fahrzeug fuhr den Grand Prix Kurs ohne Eingriff von außen, wurde dabei jedoch von außen überwacht und es konnte im Notfall über einen Notstopp per Funk eingegriffen werden. Da dies einer externen Überwachung entspricht, ist auch diese Fahrt als teilweise automatisiert einzustufen.

EasyMile WEpods

In den Niederlanden ist Ende 2015 der Testbetrieb eines fahrerlosen, jedoch im Betrieb durch einen Teleoperator abgesicherten, Personen-Shuttles gestartet²³. Die Fahrzeuge sollen zukünftig auf der Strecke von Wageningen nach Ede betrieben werden und dort mit maximal 25 km/h im öffentlichen Straßenverkehr fahren²⁴.

Bei den Easymile WEpods handelt es sich um speziell für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich konzeptionierte und konstruierte Fahrzeuge. Durch die Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit und zusätzlich eine Fokussierung auf bestimmte Strecken sind die funktionalen Anforderungen und die Sicherheitsanforderungen niedriger als beispielsweise bei automatisierten Fahrzeugen für Autobahnen und Landstraßen. Aufgrund der Überwachung durch einen Teleoperator in einem Kontrollraum ist der Betrieb als teilweise automatisiert einzustufen.

Ähnliche Fahrzeuge sind auch an den Flughäfen Rotterdam und London-Heathrow aktiv, jedoch nicht im öffentlichen Straßenverkehr²⁵. Zukünftig sollen die Fahrzeuge auch in der Innenstadt von London eingesetzt werden²⁶.

Google Inc.

Besondere Aufmerksamkeit hat das Projekt der Google Inc. zu automatisierten Fahrzeugen erhalten. Medienwirksam wurde ein eingeschränkt sehfähiger Passagier an das Steuer gesetzt

²²Pressebericht der AUDI AG vom April 2015 (http://www.audi.de/de/brand/de/vorsprung_durch_technik/content/2015/04/beweis-fuehrung.html, abgerufen am 23.03.2016)

²³Homepage des Projekts WEpods: <http://wepods.nl>, abgerufen am 23.03.2016

²⁴Pressemeldung von wired.de vom 22. September 2015 (<https://www.wired.de/collection/tech/den-niederlanden-verkehren-bald-fahrerlose-minibusse>, abgerufen am 23.03.2016)

²⁵Pressemeldung der Frankfurter Rundschau vom 05. Januar 2016 (<http://www.fr-online.de/wirtschaft/wepod-fahrerlose-busse-im-test,1472780,33063850.html>, abgerufen am 03.04.2016)

²⁶Pressemeldung der BBC vom 29. Januar 2016 (<http://www.bbc.com/news/technology-35432687>, abgerufen am 03.04.2016)

und automatisiert durch eine Vorstadt chauffiert²⁷. Der Ansatz der Google Inc. verlässt sich auf einen 360°-Laserscanner auf dem Dach des Fahrzeugs. Dieser wird sowohl zur Lokalisierung als auch zur Umfeldwahrnehmung eingesetzt. Zwar werden weitere Sensoren, wie zum Beispiel Kameras, eingesetzt, jedoch können diese den Ausfall des Laserscanners nicht kompensieren. Außerdem muss das Fahrzeug eine Strecke zuvor manuell gefahren sein, bevor diese automatisiert zurückgelegt werden kann (Urmson, 2012). Starke Veränderungen an einer Strecke könnten dadurch zu Schwierigkeiten führen. Wie in Chatham (2013) beschrieben, gab es 2013 noch zahlreiche Situationen, die die Leistungsfähigkeit des Systems übersteigen. Der sichere Zustand bei diesen Fahrzeugen ist ebenfalls die Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer. Auch in den Fahrzeugen der Google Inc. ist stets ein trainierter Sicherheitsfahrer an Bord, der die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen kann. Zusätzlich musste bis 2013 eine weitere Person im Fahrzeug sein, die das Fahrzeugführungssystem überwacht (Chatham, 2013)²⁸. Über weitere Sicherheitsvorkehrungen ist dem Autor der vorliegenden Arbeit nichts bekannt.

2014 wurde ein Prototyp vorgestellt, der nicht über Bedienelemente für den Fahrer verfügt und somit auf jeden Fall mit dem Automatisierungsgrad 5 einzustufen ist, da es keine Möglichkeit zur Übersteuerung gibt. Diese Fahrzeuge werden aktuell jedoch nur mit Bedienelementen und Sicherheitsfahrer im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt (Google Inc., 2015). Daraus resultiert auch hier ein teilweise automatisierter Betrieb.

3.6 Fazit

Wie die betrachteten Projekte zeigen, gibt es bisher noch kein einheitliches Sicherheitskonzept, das alle Anforderungen an eine bedingte, hohe und volle Automatisierung von Fahrzeugen ohne Sicherheitsfahrer im öffentlichen Straßenverkehr erfüllt. In einigen der Projekte wurden jedoch Konzepte und Sicherheitsfunktionen gezeigt, die verschiedene Situationen und Ereignisse abdecken. Nimmt man an, dass der sichere Zustand zukünftig wie in NHTSA (2013, Abschnitt 16.2 (d)) beschrieben, erreicht werden muss, muss ein automatisiertes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt der Fahrt in der Lage sein, den fließenden Verkehr zu verlassen und am Straßenrand oder auf einem Seitenstreifen anzuhalten (*Kapitel 1.3.7*). Dies würde Fahrstreifenwechsel erfordern, die wiederum von einer zuverlässig funktionierenden Umfeldwahrnehmung, Entscheidungsfindung und deren Umsetzung abhängen. Ein einfaches Anhalten, wie es in einigen der Projekte neben der Übergabe an den Sicherheitsfahrer gemacht wird, ist demnach nicht ausreichend, jedoch als allerletzte Aktion dennoch sinnvoll.

Die übliche Variante zur Absicherung des Systems stellt der Sicherheitsfahrer dar, der zu jeder Zeit eingreifen kann und stets auf das Verkehrsgeschehen und das Verhalten des Fahrzeugs achten muss. Dem Autor der vorliegenden Arbeit sind bisher noch keine Genehmigungen zu Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr ohne Sicherheitsfahrer bekannt.

Zusammenfassend vereint automatisiertes Fahren viele Eigenschaften der vorgestellten Anwendungsbereiche von elektrischen und elektronischen Systemen mit Softwarekomponen-

²⁷Artikel in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung vom 10. Juni 2012 (<http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/googles-selbstfahrende-autos-das-auto-wird-automobil-11773949.html>, abgerufen am 23.03.2016) und Artikel in den VDI-Nachrichten vom 21. Dezember 2012 (<http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Fahrerlose-Autos-fahren-in-den-USA-mit-Zulassung/61930/2>, abgerufen am 23.03.2016)

²⁸Blogbeitrag im IEEE spectrum vom 18. Oktober 2011 (<http://spectrum.ieee.org/autoton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-driving-car-works>, abgerufen am 23.03.2016)

ten. Die funktionale Sicherheit spielt eine große Rolle und die Anforderungen an diese sind vergleichsweise hoch.

Die Nutzung einer Kombination aus den vorgestellten Ansätzen und eine Erweiterung dieser zur Ermöglichung sicheren Verhaltens und zur funktionalen Sicherheit ist notwendig. Ein möglicher Ansatz für ein funktionales Sicherheitskonzept für automatisierte Fahrzeuge wird in *Kapitel 10* der vorliegenden Arbeit vorgestellt. Aufgrund des aktuellen Stands der Forschung und Technik verspricht das Konzept der Selbstrepräsentation und darauf basierender Sicherheitsaktionen einen Beitrag zur Lösung des Problems leisten zu können.

Bisher ebenfalls noch nicht ausreichend erforscht sind die erforderlichen Prozessschritte bei der Konzeption von automatisierten Fahrzeugen, um auch in unvorhergesehenen Situationen ein sicheres Verhalten zu erreichen. In *Kapitel 5* der vorliegenden Arbeit wird die Konzeptphase und im Speziellen die Erstellung der Item-Definition nach Norm ISO 26262 betrachtet und ein Vorschlag zur Erweiterung vorgestellt.

Die Zusammenstellung des Standes der Wissenschaft und Technik führt zu weiteren Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf. In der folgenden *Tabelle 3.1* werden die Anforderungen aus *Tabelle 1.4* erweitert.

Neben weiteren Anforderungen lassen sich aus dem Stand der Technik auch Vorgehensweisen, Konzepte und Praktiken ableiten. Diese sind in *Tabelle 3.2* zusammengefasst.

Nr.	Anforderung
A01	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss eine Fahrmission in seinem Einsatzgebiet ohne menschlichen Eingriff erledigen.
–A01.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur in seinem Einsatzgebiet betrieben werden können.
–A01.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die Insassen nicht gefährden.
–A01.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die weiteren Verkehrsteilnehmer nicht gefährden.
A02	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Umfeld des Fahrzeugs wahrnehmen.
A03	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen planen.
A04	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen ausführen.
–A04.1	Als letzte Aktion im Betrieb muss das vollständig automatisierte Fahrzeug in den Stillstand abbremsen.
A05	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich selbst wahrnehmen und benötigt eine Selbstrepräsentation, um seine eigenen Systemgrenzen im Betrieb zu ermitteln.
–A05.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Fahrzeugzustand überwachen.
A06	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Ladung überwachen.
A07	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Insassen unterstützen.
A08	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss internationale und nationale Gesetze, Verordnungen und Richtlinien umsetzen.

Tabelle 3.1: Erweiterung der resultierenden Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf basierend auf dem Stand der Technik. Geänderte und im Vergleich zu *Tabelle 1.4* hinzugekommene Anforderungen sind grau hinterlegt. Untergeordnete Gliederungsebenen bedeuten eine Verfeinerung der übergeordneten Anforderungen.

Vorgehensweise	Ursprung, zum Beispiel
Neben dem Betrieb müssen Entwicklung, Test und Wartung von automatisierten Fahrzeugen sicher sein.	Industrieroboter (OSHA, 2006), Fahrzeugführungssysteme
Der Entwicklungsprozess für automatisierte Fahrzeuge muss die resultierende Sicherheit im Betrieb von Beginn an berücksichtigen.	Kraftwerkstechnik IAEA (2012)
Neben der Funktion des automatisierten Fahrens können übergeordnete Sicherheitsregeln eine Gefährdung von Insassen und weiteren Verkehrsteilnehmern verhindern.	Mobile Roboter (Woodman u. a., 2012)
Eine Standardisierung und Normung kann zu einem einheitlichen Sicherheitsniveau von automatisierten Fahrzeugen beitragen.	Luftfahrt, Bahnbereich, Fahrerassistenzsysteme
Kann ein sicherer Betrieb nicht mit bordeigener Technologie erreicht werden, können Infrastrukturmaßnahmen die Sicherheit im Betrieb erhöhen.	Bahnbereich (Pascoe und Eichorn, 2009)
Redundante Technologien und Redundanzmechanismen können die Toleranz gegen interne Systemfehler und externe Einflüsse erhöhen.	Fly-by-wire (Yeh, 2013), Drive-by-wire (Bergmiller, 2014)
Bei einem drohenden Verlassen der Systemgrenzen können Aktionspläne den Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs in einem sicheren Zustand halten.	(Binfet-Kull u. a., 1998; Hörwick und Siedersberger, 2010a)
Für den Testbetrieb von automatisierten Fahrzeugen kann ein Sicherheitsfahrer die Anforderungen an die funktionale Sicherheit reduzieren.	Diverse Projekte zu Fahrzeugführungssystemen

Tabelle 3.2: Vorgehensweise, Konzepte und Praktiken, die zu einer sicheren Entwicklung und einem sicheren Betrieb von automatisierten Fahrzeugen beitragen können. Beispielhaft sind Veröffentlichungen aus den betrachteten Bereichen angeführt.

Teil II

Beitrag zum Entwicklungsprozess für
das vollständig automatisierte
Fahrzeug auf Abruf

Einführung

Das Ziel in Teil II der vorliegenden Arbeit ist die Betrachtung und exemplarische Anwendung des Entwicklungsprozesses für ein Fahrzeugführungssystem für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf (*Kapitel 1.4.1*), das den Automatisierungsgrad 5 erreicht und somit fahrerlos und ohne Überwachung betrieben werden kann. Es wird daher von der Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems ohne menschliche Rückfallebene ausgegangen.

Der Beitrag zum Stand der Forschung liegt in der Analyse und Erweiterung des existierenden Entwicklungsprozesses nach Norm ISO 26262. Die Möglichkeiten und Limitationen der Anwendbarkeit auf Fahrzeuge mit den Automatisierungsgraden 3 bis 5 wurden bisher nicht in diesem Umfang durchgeführt.

In *Kapitel 4* wird der Entwicklungsprozess nach Norm ISO 26262 vorgestellt und Limitationen bei der Anwendung auf Fahrzeugführungssysteme für automatisierte Fahrzeuge werden aufgezeigt. In *Kapitel 5* werden empfohlene Prozessschritte vorgestellt, die über den bestehenden Prozess hinausgehen. Die Vorgehensweise zur Analyse des Entwicklungsprozesses beinhaltet eine Literaturrecherche zur Anwendung der Norm ISO 26262 auf automatisierte Fahrzeuge. Basierend auf den Erfahrungen aus dem Projekt Stadtpilot und aus der Betrachtung von früheren Arbeiten zur Automatisierung von Fahrzeugen wird eine Erweiterung des Entwicklungsprozesses vorgestellt.

In *Kapitel 6* werden die vorgeschlagenen Prozessschritte exemplarisch auf das automatisierte Fahrzeug auf Abruf angewendet. Hierbei ist zu beachten, dass der Ablauf der Entwicklung im Vordergrund steht. In der vorliegenden Arbeit werden die einzelnen Schritte nicht vollständig durchgeführt und evaluiert. Jeder der Entwicklungsschritte bietet das Potential für weitere Forschungsarbeiten, um von dem aktuell verwendeten Expertenwissen zu einem methodischen Vorgehen übergehen zu können.

4 Entwicklung von elektronischen Fahrzeugsystemen nach Norm ISO 26262

Eine Vorgehensweise zur Entwicklung von elektronischen Fahrzeugsystemen ist in der Norm ISO 26262 beschrieben. In der vorliegenden Arbeit wird das in der Norm enthaltene Vorgehensmodell zur Strukturierung der folgenden Kapitel genutzt, da es sich eignet, um Teile des Lebenszyklus eines Fahrzeugführungssystems für ein automatisiertes Fahrzeug von der Idee über die Entwicklung und den Test und bis hin zum Betrieb zu beschreiben.

4.1 Entwicklungsprozess nach Norm ISO 26262

Die im Automobilbereich im Jahr 2011 eingeführte Norm ISO 26262 dient als Grundlage für die Entwicklung von elektronischen Fahrzeugsystemen. In dieser Norm werden Methoden und Werkzeuge zur System-, Hardware- und Softwareentwicklung für sicherheitsrelevante Systeme und Komponenten vorgeschlagen. Die folgende Betrachtung der Vorgehensweise zur Entwicklung von elektrischen/elektronischen Systemen in der Norm ISO 26262 zeigt den Stand der Technik bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Einen Überblick über die Bestandteile und Prozessschritte der Norm gibt *Abbildung 4.1* aus ISO 26262 (2011, Teil 3).

Eine wesentliche Aufgabe der Norm ist die Definition eines Rahmens zur Identifikation und Bewertung von sicherheitsrelevanten Funktionen, der Ableitung von Sicherheitsanforderungen an diese und der Empfehlung von Maßnahmen zur Vorgehensweise und zur technischen Umsetzung dieser Anforderungen. Die Norm besteht aus neun Teilen, deren Inhalt im Folgenden zusammengefasst wird.

Wichtige Begriffe im Zusammenhang mit der Nutzung der Norm werden in Teil 1 definiert. Dies dient zur Schaffung eines einheitlichen Sprachverständnisses bei der Anwendung der darauf folgenden Entwicklungsschritte (ISO 26262, 2011, Teil 1).

Die Vorgehensweise zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen erfolgt nach dem V-Modell, das auch in vielen anderen Entwicklungsbereichen eingesetzt wird (VDI 2206, 2004). Zunächst wird ein Produkt-Lebenszyklus initiiert, der als Rahmen für die Entwicklung eines Systems dient. Dieser Lebenszyklus beinhaltet Schritte von der Konzeption über die Entwicklung und den Test eines Systems, dessen Inbetriebnahme und die Außerbetriebnahme. In *Abbildung 4.1* zeigt sich das Zusammenspiel der einzelnen Entwicklungsphasen im Lebenszyklus. Zusätzlich wird ein Sicherheits-Lebenszyklus definiert, bei dem die funktionale Sicherheit im Vordergrund steht (ISO 26262, 2011, Teil 2). Die Konzeptionsphase in Teil 3 enthält die so genannte Item-Definition¹. Unter Item wird das zu entwickelnde System oder ein System aus Systemen verstanden. In der Item-Definition wird eine Funktionsbeschreibung des Systems und eine Beschreibung des Kontextes erstellt. Der Kontext beinhaltet die Domäne(n) in der der Entwicklungsgegenstand eingesetzt werden soll. Fahrerassistenzsysteme

¹Freie Übersetzung: *Definition des Entwicklungsgegenstands*. Auf eine Übersetzung des Begriffs ins Deutsche wird in der vorliegenden Arbeit verzichtet, da keine passende Übersetzung gefunden werden konnte, die den Begriff im Deutschen wiedergibt.

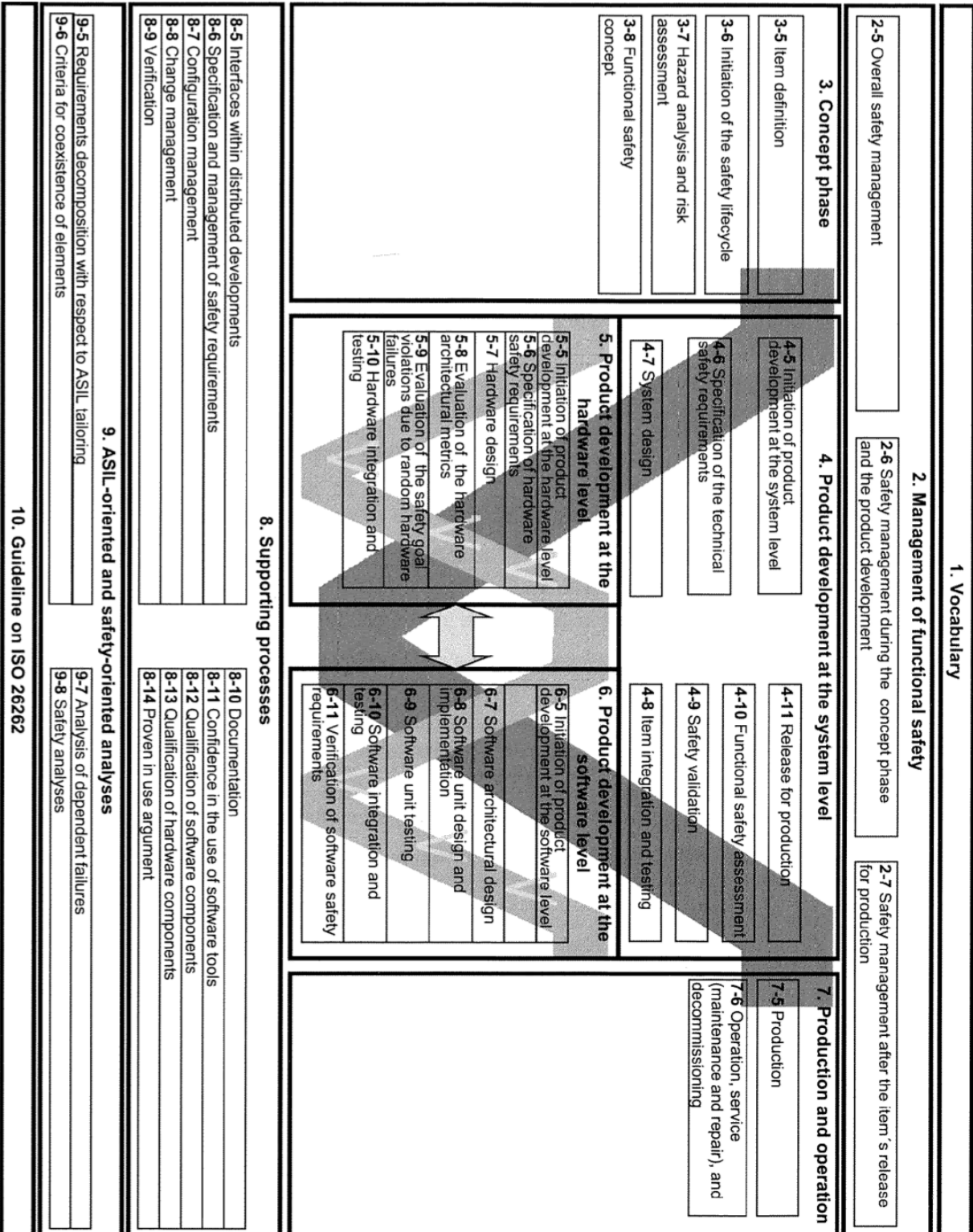


Abbildung 4.1: „Überblick über die Norm ISO 26262“ aus ISO 26262 (2011)

können aus einem oder mehreren Items im Sinne der Norm ISO 26262 bestehen (ISO 26262, 2011; Kriso u. a., 2013). Es ist beispielsweise denkbar, bei einem Fahrerassistenzsystem das Gesamtsystem bestehend aus Wahrnehmung, Logik und Aktorik als ein Item aufzufassen oder jedes dieser Systeme einzeln. Für die vorliegende Arbeit wird das gesamte Fahrzeugführungssystem für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf bestehend aus allen Subsystemen als ein Item angesehen.

In der Item-Definition wird eine funktionale Systemarchitektur erstellt. Bei der Erstellung dieser können und sollen das gesamte Wissen und alle vorhandenen ähnlichen oder in Bezug zum Item stehenden Produkte, beispielsweise aus früheren Entwicklungen, einfließen. Besonders Komponenten, die als *proven-in-use* (Freie Übersetzung: betriebsbewährt) anzusehen sind, sich also im Einsatz bereits bewährt haben, können den Entwicklungsaufwand reduzieren.

Alle zu entwickelnden Funktionen werden bereits in der Konzeptphase in Teil 3 der Norm ISO 26262 auf Gefährdungen analysiert. Die identifizierten Gefährdungen werden nach den Automotive Safety Integrity Level (Wörtliche Übersetzung: Automobil-Sicherheitsintegritätslevel, ASIL) klassifiziert und Sicherheitsziele dafür formuliert. Anschließend werden den Komponenten des Systems die ermittelten ASIL zugeordnet und es wird ein funktionales Sicherheitskonzept für das System erstellt (ISO 26262, 2011, Teil 3) (siehe *Kapitel 10* der vorliegenden Arbeit). Auch die Sicherheitsziele werden benannt (ISO 26262, 2011, Teil 3). Die ASIL sind Level, die unterschiedliche Anforderungen an den Entwicklungsprozess und die Ausfallraten der Hardware stellen. Das niedrigste ASIL ist QM (Quality Management, wörtliche Übersetzung: Qualitätsmanagement). Die weiteren ASIL werden von A-D nummeriert, wobei ein Sicherheitsziel mit ASIL D die höchsten Sicherheitsanforderungen hat. Zur Festlegung des ASIL können unterstützende Methoden zur Bewertung von Funktionen aus Teil 9 der Norm verwendet werden (ISO 26262, 2011, Teil 9). Die darin vorgestellten Methoden sollen die Analyse einer Funktion erleichtern und die Sicherheitsanforderungen an diese Funktion festlegen.

Bei der Systementwicklung werden aus den Sicherheitszielen die Sicherheitsanforderungen und das Sicherheitskonzept erstellt. Die Sicherheitsanforderungen werden parallel zu den funktionalen Anforderungen erstellt und somit direkt in den Entwicklungsprozess integriert. Gleichzeitig werden die Schritte zur Validierung der Sicherheitsanforderungen sowie Testfälle formuliert, die nach Abschluss der Entwicklung und Integration von Hardware- und Softwarekomponenten erfolgreich durchlaufen werden müssen (ISO 26262, 2011, Teil 4).

Nach dem Design des Gesamtsystems werden die einzelnen Komponenten detaillierter spezifiziert und entwickelt. Bei den Hardwarekomponenten folgt die Entwicklung einem eigenen Entwicklungsprozess nach dem V-Modell. Darin werden Sicherheitsanforderungen auf die Hardware bezogen und verfeinert, damit das Design und die Entwicklung die Sicherheitsanforderungen erfüllen. Nach der detaillierten Spezifikation der Hardwareanforderungen werden Testfälle entwickelt, die sowohl funktionale als auch sicherheitstechnische Anforderungen der Hardware beinhalten. Darauf folgen die Entwicklung und der Test der Hardware. Das Ergebnis dieser Phase ist eine funktional sichere Hardware (ISO 26262, 2011, Teil 5). Die Entwicklung der Software erfolgt parallel und analog zur Hardware in einem eigenen Entwicklungsprozess, ebenfalls basierend auf dem V-Modell (ISO 26262, 2011, Teil 6). Als Ergebnis stehen Hardware- und Softwarekomponenten zur Verfügung, die, wie oben beschrieben, auf Systemebene integriert und getestet werden (ISO 26262, 2011, Teil 4). Sind alle

funktionalen und sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllt, so kann das System in die Produktion gehen (ISO 26262, 2011, Teil 7).

In Teil 8 der Norm werden bei der Entwicklung unterstützende Prozesse, wie zum Beispiel das Konfigurationsmanagement und die Dokumentation, vorgestellt. Diese dienen vor allem zum Management der Produktentwicklung (ISO 26262, 2011, Teil 8).

4.2 Kritik zur Konzeptphase des Entwicklungsprozesses nach Norm ISO 26262

Der Entwicklungsprozess und die darin identifizierten Sicherheitsmechanismen, Metriken und Maßnahmen sollen die funktionale Sicherheit von elektronischen Fahrzeugsystemen ermöglichen. Aufgrund von vier Eigenschaften der Norm, ist eine vollständige Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems mit der Norm nicht abgedeckt.

1. Das Vorgehen zur Definition eines Items ist nicht ausführlich beschrieben, wodurch es möglich wird, je nach Wahl der Item-Grenzen unterschiedliche Sicherheitsanforderungen an die Ausfallraten der Hardware zu erreichen. Kriso u. a. (2013) haben dies für einen Abstandsregeltempomat dargestellt. Dieses Problem wird insofern umgangen, als dass ein Fahrzeugführungssystem in der vorliegenden Arbeit als ein Gesamtsystem verstanden wird und somit auch als ein Item im Sinne der Item-Definition der Norm ISO 26262 definiert wird. Dies hat zur Folge, dass alle Aktoren, Steuergeräte, die gesamte Vernetzung und die Software von Sicherheitszielen betroffen sein können. Wie Kriso u. a. (2013) herausstellen, erreicht man durch dieses Vorgehen höhere Anforderungen an alle beteiligten Komponenten als bei einer Aufteilung des Gesamtsystems in einzelne Items. Dies wird in der vorliegenden Arbeit als Vorteil gewertet, da die Sicherheit im Vordergrund steht. Nachteilig kann sich das Vorgehen auswirken, wenn Komponenten, die sich beispielsweise bereits im Betrieb bewährt haben, nun Sicherheitsziele mit höheren ASIL erfüllen müssen und mit dem aktuellen Stand der Technik nicht erfüllt werden können (Kriso u. a., 2013). Als Konsequenz könnte ein Fahrzeugführungssystem nicht umgesetzt werden kann, da es technologisch nicht möglich ist.
2. Im Entwicklungsprozess werden keine Metriken für die Softwarekomponenten des Items eingeführt. Die ASIL zielen nur auf Ausfallraten der Hardware und auf anzuwendende Methoden zur Verhinderung funktionaler Fehler ab. Dies reicht nach Ansicht des Autors der vorliegenden Arbeit für die Entwicklung von Fahrzeugführungssystemen nicht aus, da durch die Entwicklung sicherer Hardware nicht erreicht werden kann, dass ein Fahrzeugführungssystem immer in einem sicheren Zustand betrieben werden kann, sondern nur, dass die Hardware Ausfallraten erfüllt. Zusätzlich müssen Metriken für die Qualität der Softwarekomponenten eingeführt werden. Dies ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.
3. In der Item-Definition wird kein strukturierter Prozess zur Ableitung der Anforderungen im Hinblick auf ein offenes System hinsichtlich der Umfeldwahrnehmung gegeben. Eine Analyse und Erhebung der funktionalen Anforderungen wird zwar in den Prozess integriert, jedoch wird nicht beschrieben, wie dies erfolgen soll. Für die Entwicklung von Fahrzeugführungssystemen ist dies nicht ausreichend, da die Inhalte der Norm

keine Vorgehensweisen zur Spezifikation eines Fahrzeugführungssystems enthalten. Dies ist zwar verständlich, da die Norm ISO 26262 auf die funktionale Sicherheit für elektrische/elektronische Systeme abzielt, jedoch fehlt ein anderer normativer Rahmen für automatisierte Fahrzeuge bisher. Es ist erforderlich, bevor ein System funktional sicher entwickelt werden kann, zu definieren, welchen Funktionsumfang ein System haben soll, welchen Automatisierungsgrad es erreichen soll und in welcher Einsatzumgebung es betrieben werden soll.

4. In der Norm ISO 26262 werden keine Qualitätsmerkmale für die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugführungssystems gegeben. Dadurch ist es nicht möglich, Freigabekriterien zu definieren, welche vor Inbetriebnahme eines Systems im Straßenverkehr erfüllt sein müssen. Hieraus ergibt sich ein aktueller Forschungsbedarf: Es müssen geeignete Metriken definiert werden, die eine Aussage über die Qualität und somit auch die Vergleichbarkeit von Fahrzeugführungssystemen ermöglichen. Für diese Metriken müssen dann Minimalwerte definiert werden, die im Betrieb stets erreicht werden müssen. Dies hängt direkt mit den Anforderungen der Gesellschaft an das Sicherheitsniveau von automatisierten Fahrzeugen zusammen. Es stellen sich die Fragen, wie gut automatisierte Fahrzeuge im Vergleich zu menschlichen Fahrern sein müssen, und wie dies prospektiv sichergestellt werden kann. Eine retrospektive Bewertung durch Unfallzahlen ist zwar möglich, hilft aber während der Entwicklung nicht weiter. Ob dies Teil einer neuen Version der Norm ISO 26262 sein muss oder in einem anderen Rahmen definiert wird, bleibt an dieser Stelle offen. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Aspekt nicht weiter betrachtet.

Im Folgenden wird eine Erweiterung des Prozesses zur Erstellung der Item-Definition vorgeschlagen, der den dritten Kritikpunkt berücksichtigt.

5 Vorschlag zur Erweiterung des Entwicklungsprozesses zur Erstellung der Item-Definition

Der Entwicklungsprozess nach Norm ISO 26262 umfasst die Konzeptphase mit Anforderungsdefinition und Sicherheitsanalyse, die Entwicklung der Hardware und Software und diverse Teststufen. In diesem Kapitel wird der Fokus auf das Kapitel *3-5 Item-Definition* der Norm ISO 26262 gelegt und basierend darauf eine Erweiterung der Prozessschritte für automatisierte Fahrzeuge vorgeschlagen.

Obwohl sich das Vorgehen bei der Ermittlung der Sicherheitsanforderungen in der Norm ISO 26262 nur bedingt auf automatisierte Fahrzeuge übertragen lässt, kann der darin vorgestellte Entwicklungsprozess dennoch als Referenz eingesetzt werden. Die vorgeschlagenen Prozessschritte und Entwicklungsergebnisse können übernommen werden. In der vorliegenden Arbeit werden diese erweitert, damit die Sicherheit des späteren Betriebs bereits in der Konzeptphase stärker berücksichtigt wird.

In einem automatisierten Fahrzeug wird der größte Teil der Fahrzeugführungsfunktion durch Software erreicht. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Sicherheit und an die Offenheit gegenüber digitaler Kommunikation muss die Software strukturiert und fehlerarm entwickelt werden. Dies wird durch die Nutzung von Werkzeugen, die eine Beherrschung der Komplexität im Hinblick auf die große Zahl von Anforderungen und von resultierenden Komponenten erleichtern, unterstützt. Zusätzlich zur Softwarequalität sind ihre Zuverlässigkeit, Überwachbarkeit und Dokumentation von großer Bedeutung.

Beim Einsatz von automatisierten Fahrzeugen wird davon ausgegangen, dass die Kommunikation des Fahrzeugs mit der Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern eine Rolle spielt, falls eine bedingte, hohe oder vollständige Automatisierung nicht mit bordeigener Technologie erreicht werden kann. Es ist daher notwendig, offene Schnittstellen zu Drittanbietern, beispielsweise von digitalen Karten und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation, vorzusehen. Dies muss bei der Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems beachtet werden. Hierdurch rückt auch die Datensicherheit in den Fokus der Entwicklung. In der vorliegenden Arbeit wird diese jedoch nicht betrachtet.

Der Testaufwand für ein Fahrzeugführungssystem ist durch die hohe Anzahl an möglichen Situationen sehr groß. Im Bereich der Fahrzeugentwicklung und besonders bei der Entwicklung von Fahrerassistenzfunktionen ist eine hohe Anzahl von Testkilometern notwendig, da es im Straßenverkehr sehr viele unterschiedliche Situationen gibt, die von einem System beherrscht werden müssen. Wachenfeld und Winner (2015, Seite 457f.) ermitteln eine Zahl von 6,62 Milliarden Kilometern für den Autobahnpilot. Obwohl für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf noch keine Zahl für die Anzahl der Testkilometer vorliegt, so würde diese nicht wirtschaftlich erbracht werden können. Das Ziel ist es, möglichst viele Teile des Systems in einer großen Anzahl unterschiedlicher Szenarien zu testen. Es soll eine hohe Testabdeckung erreicht werden, ohne den zeitlichen Aufwand für die Durchführung der Tests unwirtschaftlich zu gestalten. Zur Definition des Funktionsumfangs müssen die

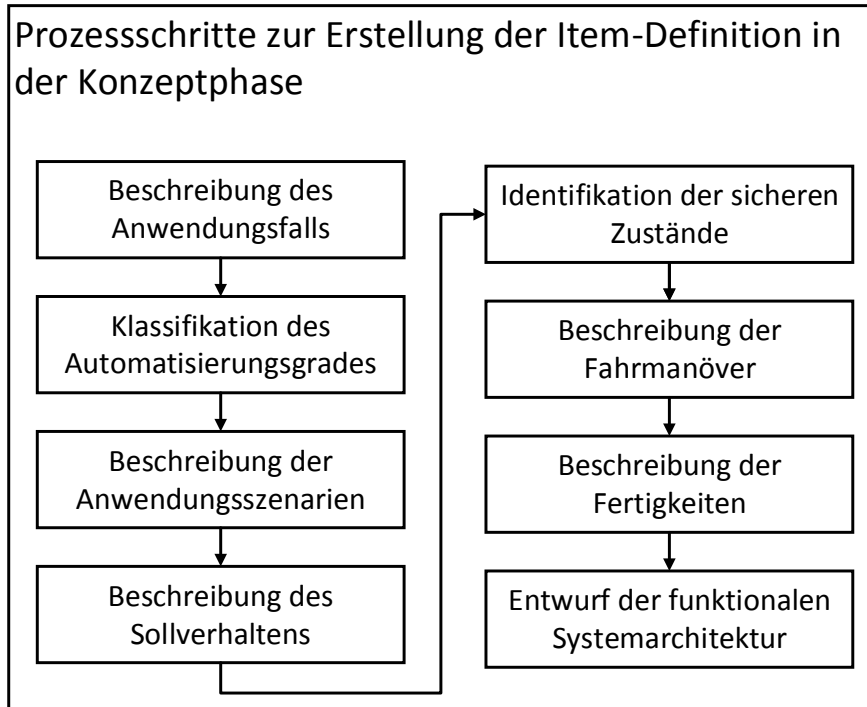


Abbildung 5.1: Prozessschritte zur Erstellung der Item-Definition in der Konzeptphase

relevanten Szenarien bereits in der Konzeptphase gesammelt und analysiert werden, damit das Sollverhalten und die sicheren Zustände definiert werden können. Dieses Resultat kann dann für die Tests des Fahrzeugs genutzt werden.

Vorgeschlagene Prozessschritte zur Erstellung der Item-Definition

Zu Beginn der Entwicklung steht die vollständige Beschreibung des Anwendungsfalls für das automatisierte Fahrzeug. In *Abbildung 5.1* werden die an die Norm ISO 26262 angelehnten Prozessschritte beginnend mit der Beschreibung des Anwendungsfalls dargestellt. Diese werden im Idealfall sequenziell durchgeführt, jedoch erscheinen Iterationen innerhalb des gesamten Prozesses erforderlich, da Ergebnisse einzelner Schritte erforderliche Änderungen in den vorhergehenden Schritten nach sich ziehen können. Alle Ergebnisse der Prozessschritte sind Teil der Item-Definition in der Norm ISO 26262 (ISO 26262, 2011, Teil 3), beziehungsweise eine Erweiterung des in der Norm geforderten Umfangs.

Im Rahmen des Projekts Stadtpilot zeigte sich, dass sich die am häufigsten vorkommenden Szenarien, wie zum Beispiel das Folgen eines Fahrstreifens, prototypisch umsetzen lassen. Dies konnte in der Praxis ohne strukturierten Prozess erreicht werden, da ein Sicherheitsfahrer zur Verfügung stand. Sobald der Funktionsumfang auf Szenarien mit mehr zu berücksichtigenden Elementen erweitert werden soll oder die Aufgaben des Sicherheitsfahrers reduziert werden sollen, zeigt sich der Bedarf eines strukturierten Prozesses.

Basierend auf der geplanten Erweiterung des Funktionsumfangs und der Reduzierung der Aufgaben des Sicherheitsfahrers, wurden die folgenden Prozessschritte abgeleitet.

Schritt 1: Beschreibung des Anwendungsfalls

In der Beschreibung des Anwendungsfalls wird die Nutzung des automatisierten Fahrzeugs durch den Menschen beschrieben. Hier wird festgelegt, welche Aufgaben des Fahrers das Fahrzeugführungssystem übernimmt und in welcher Einsatzumgebung dies möglich ist. Auch die verbleibenden Aufgaben des Menschen werden hier beschrieben. In *Kapitel 1.4.1* ist der Anwendungsfall des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf beschrieben. Dieser Schritt ist bereits im vorgeschlagenen Prozess der Norm ISO 26262 enthalten.

Schritt 2: Klassifikation des Automatisierungsgrades

Nachdem der Anwendungsfall beschrieben ist, kann auf Basis des Entscheidungsbaumes aus *Kapitel 1.3.5* der Automatisierungsgrad bestimmt werden. Dadurch wird eine Bestimmung der relevanten Normen und Gesetze möglich. Der Automatisierungsgrad legt fest, welche Mechanismen zur Interaktion des Fahrzeugs mit dem Fahrer notwendig sind. Auch die Notwendigkeit der Art der Überwachung und Rückfallebene kann bestimmt werden. Die Unterscheidung von Automatisierungsgraden ist bisher nicht Teil der Norm ISO 26262 und wird hier als zusätzlicher Schritt eingeführt.

Schritt 3: Beschreibung der Anwendungsszenarien

Die Beschreibung des Anwendungsfalls wird durch die Beschreibung von Szenarien detailliert, sodass für jedes Szenario im nächsten Schritt das Sollverhalten des vollständig automatisierten Fahrzeugs identifiziert werden kann. Die Szenarien sind eine Abfolge von Ereignissen und Aktionen, die im Straßenverkehr auftreten können. Je detaillierter diese beschrieben sind, umso umfangreicher können die Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug festgelegt werden. Eine besondere Herausforderung besteht in der Identifikation von Situationen innerhalb von Szenarien, die einerseits kritisch für menschliche Fahrer sind, andererseits kritisch für das vollständig automatisierte Fahrzeug werden können. Ein sicheres Verhalten des automatisierten Fahrzeugs als der Mensch in für den Menschen kritischen Situationen kann zu einer Reduzierung der gesamtverkehrlichen Unfallzahlen, Verletzten und Getöteten führen (*Schritt 4*). Kritische Situationen für das vollständig automatisierte Fahrzeug können neue, nur durch die Automatisierung bedingte Unfälle verursachen. Diese wirken sich negativ auf die gesamtverkehrliche Unfallbilanz aus. In *Kapitel 6.1.2* werden beispielhafte Szenarien für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf beschrieben.

Im Rahmen der Norm ISO 26262 wird dieser Schritt nicht explizit gefordert. Der Beschreibung der Anwendungsszenarien kommt jedoch eine große Bedeutung zu, da darin die Einsatzumgebung und die möglichen beweglichen und unbeweglichen Elemente von Szenarien sowie deren Eigenschaften beschrieben werden. Auch für den Test des automatisierten Fahrzeugs sind die Szenarien notwendig. Aus diesen werden die Testfälle abgeleitet, die mit den verschiedenen Testwerkzeugen durchgeführt werden müssen.

Eine hervorzuhebende Herausforderung ist die Festlegung einer Mindestmenge von zu betrachtenden Szenarien für eine spätere Freigabe eines Fahrzeugführungssystems. Beim Straßenverkehr handelt es sich um ein offenes System mit einer sehr großen Menge an möglichen Szenarien und Situationen. Über Expertenwissen, Feldstudien und Messfahrten lassen sich zwar viele Szenarien und Situationen beschreiben, jedoch sind dem Autor der vorliegenden Arbeit keine Verfahren bekannt, mit denen der Nachweis der Vollständigkeit oder zumindest des notwendigen Umfangs einer Menge von Szenarien nachgewiesen werden

kann. Die für 2016 angekündigte Dissertation von Fabian Schuldt widmet sich diesem Thema (Schuldt, 2016).

Schritt 4: Beschreibung des Sollverhaltens

Basierend auf den Szenarien kann das Sollverhalten des automatisierten Fahrzeugs beschrieben werden. Das Sollverhalten ist das gewünschte Verhalten, das bei einem fehlerfreien Betrieb des automatisierten Fahrzeugs erreicht wird. Hierfür ist eine Analyse der rechtlichen und ethischen Aspekte des Einsatzes des automatisierten Fahrzeugs erforderlich. In *Kapitel 6.2* wird ein generalisiertes Sollverhalten basierend auf den betrachteten Anwendungsszenarien des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf beschrieben.

Die Mindestanforderungen an das Sollverhalten für verschiedene Fahrerassistenzsysteme sind in den bereits genannten separaten Normen beschrieben (ISO 11270, 2014; ISO 15622, 2010; ISO 22178, 2009; ISO 22179, 2009). Für automatisierte Fahrzeuge reicht dies jedoch nicht aus. Für jedes identifizierte Anwendungsszenario und den damit möglichen Situationen muss das gewünschte Verhalten spezifiziert werden, um im nachgelagerten Testprozess geeignete Testfälle erzeugen zu können. Hier geht der vorgeschlagene Prozess über die Norm ISO 26262 hinaus.

Schritt 5: Identifikation der sicheren Zustände

Aus der Beschreibung der Szenarien und des Sollverhaltens in den Szenarien können mögliche sichere Zustände des automatisierten Fahrzeugs abgeleitet werden. Je nachdem, wie sich ein automatisiertes Fahrzeug verhalten soll, in welche Situationen es geraten kann und welche Fehler auftreten können, kann definiert werden, welche sicheren Zustände situativ erreicht werden müssen, falls eine normale Weiterfahrt nicht mehr möglich ist. In *Kapitel 6.3* werden beispielhaft sichere Zustände für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf beschrieben.

Dieser Schritt ist ebenfalls neu und erweitert den Prozess nach Norm ISO 26262.

Schritt 6: Beschreibung der Fahrmanöver

Das Sollverhalten wird so lange weiter detailliert, bis eine Menge von erforderlichen Fahrmanövern identifiziert werden kann. Fahrmanöver eignen sich zur abstrakten Beschreibung von zeitlich und/oder räumlich abgeschlossenen Verhaltensweisen. In *Kapitel 6.4* wird eine Menge von Fahrmanövern beschrieben, die ein vollständig automatisiertes Fahrzeug auf Abruf beherrschen muss.

Die Beschreibung von Fahrmanövern ist ein neuer Prozessschritt, der so nicht in der Norm ISO 26262 oder in separaten Normen für Fahrerassistenzsysteme enthalten ist.

Schritt 7: Beschreibung der Fertigkeiten

Aufbauend auf der Menge von Fahrmanövern und dem menschlichen Verhalten bei der Fahrzeugführung werden die notwendigen Fertigkeiten identifiziert. Der Fertigkeitengraph bietet eine Möglichkeit zur Modellierung des Systems auf einem abstrakten Level, das zunächst unabhängig von der Implementierung des Systems ist. Der Fertigkeitengraph bildet die Brücke zwischen der Beschreibung des Anwendungsfalls inklusive der Szenarien, des Sollverhaltens und der sicheren Zustände zu der funktionalen Systemarchitektur. In *Kapitel 6.5* werden die Fertigkeiten eines Fahrzeugführungssystems für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf beschrieben, die zur Ausführung der Fahrmanöver erforderlich sind. Aufgrund der zahlreichen Aufgaben, die ein Mensch im Straßenverkehr übernimmt,

ist es sinnvoll den Fertigkeitengraph als Werkzeug zur Modellierung dieser Fertigkeiten in den Entwicklungsprozess zu integrieren, um von den funktionalen Anforderungen zu einer funktionalen Systemarchitektur zu gelangen. Außerdem wird der Fertigkeitengraph im Betrieb des Fahrzeugs als Fähigkeitengraph genutzt, um eine Selbstrepräsentation zu ermöglichen. In *Kapitel 10.5* wird dies beschrieben.

Der Fertigkeitengraph wurde bisher nicht im Entwicklungsprozess berücksichtigt und stellt somit eine Neuerung dar. Im Hinblick auf die erforderliche Selbstrepräsentation ist dieser Prozessschritt notwendig.

Schritt 8: Entwurf der funktionalen Systemarchitektur

Nachdem die Fertigkeiten definiert sind, wird eine funktionale Systemarchitektur entwickelt, die das Sollverhalten und das Erreichen eines sicheren Zustands realisieren kann. Die funktionale Systemarchitektur beschreibt die funktionalen Komponenten des zu entwickelnden Systems. In *Kapitel 6.6* wird eine funktionale Systemarchitektur für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf beschrieben, die die notwendigen Fertigkeiten realisiert.

Im nachfolgenden Kapitel werden diese Prozessschritte exemplarisch auf die Entwicklung des vollständig automatisierten Fahrzeugs angewendet. Es handelt sich dabei nicht um eine vollständige Anwendung, sondern das Vorgehen soll zeigen, dass die einzelnen Schritte aufeinander aufbauen und alle notwendigen Aspekte des Betriebs von automatisierten Fahrzeugen berücksichtigt werden.

6 Anwendung des Entwicklungsprozesses zur Ableitung der Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf

In diesem Kapitel wird der in *Kapitel 5* vorgestellte Entwicklungsprozess beispielhaft auf das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf angewendet. Die grundlegende Funktionsbeschreibung erfolgte in *Kapitel 1.4.1*. Der Automatisierungsgrad dieses Systems ist *vollständig automatisiert* (*Kapitel 1.3.3* und *1.3.5*). In den folgenden Kapiteln werden die weiteren Schritte zur Ableitung der Anforderungen beschrieben.

6.1 Beschreibung der Einsatzumgebung und Ableitung von Szenarien

Der öffentliche Straßenverkehr stellt hohe Anforderungen an die Verkehrsteilnehmer. Das Straßennetz und die Umweltbedingungen verändern sich ständig und das Verhalten der Verkehrsteilnehmer ist nicht immer vorhersehbar. Daraus können sich unübersichtliche Situationen ergeben, die von einem vollständig automatisierten Fahrzeug beherrscht werden müssen.

Um die Sicherheit eines Fahrzeugs herauszufordern, eignen sich so genannte *pathologische Fälle*¹ (Maurer, 2014). Pathologische Szenarien treten zwar selten auf, jedoch können diese selbst bei einer fehlerfreien Funktion des Systems mit schwerwiegenden Konsequenzen für die Beteiligten enden. Das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs in diesen Szenarien muss sicher sein. Sie dienen dazu, von den überwiegend auftretenden Szenarien abweichende Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug abzuleiten.

Die pathologischen Szenarien für den Stadtverkehr werden in *Kapitel 6.1.2* genutzt, um beispielhaft die Anforderungen an das Fahrzeug in diesen Szenarien herauszustellen, da eine vollständige Beschreibung aller Szenarien und aller möglichen Elemente in der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden kann.

Der Einsatzbereich trägt wesentlich zu den Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug bei. Im Folgenden wird dieser kurz skizziert, um die wichtigsten Eigenschaften zu benennen und abschließend Anforderungen aus der Beschreibung abzuleiten.

6.1.1 Einsatzbereich

Für den Einsatz des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf wird in der vorliegenden Arbeit von einem Einsatz innerhalb Deutschlands ausgegangen. Einsatzbereich ist daher der öffentliche Straßenverkehr in Deutschland. Das öffentliche Straßenverkehrsnetz in Deutschland besteht aus Fernstraßen, Landstraßen und innerstädtischen Straßen (FGSV, 2009; BMVI, 2014). Der Schwerpunkt in der vorliegenden Arbeit sind die innerstädtischen Straßen. Fernstraßen und Landstraßen werden im Folgenden jedoch ebenfalls kurz skizziert.

¹Im Folgenden *pathologische Szenarien* genannt. Diese werden im Englischen als *edge cases* oder *corner cases* bezeichnet. Maurer (2016) bezeichnet diese auch als Grenzfälle oder Grenz-Szenarien.

Fernstraßen

Aufgrund des überwiegend längs gerichteten Verkehrs, der größeren Kurvenradien, breiteren Fahrstreifen und geringeren Beschilderung sind die Anforderungen an ein Fahrzeug auf Fernstraßen oft niedriger als auf Landstraßen oder in städtischer Umgebung - auch wenn die Absolutgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer und somit die kinetische Energie der Verkehrsteilnehmer höher sind. Auf Autobahnen erleichtern das seltene Vorkommen von Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern und Fahrrädern sowie das Fehlen von Kreuzungen und Lichtsignalanlagen den Betrieb. Dennoch ist auch dies nicht vollständig auszuschließen, wodurch beispielsweise Personen auf der Fahrbahn nach einem Unfall ein pathologisches Szenario ausmachen können.

Bei der Nutzung eines automatisierten Fahrzeugs auf Fernstraßen ergeben sich Szenarien wie das Folgen eines Fahrstreifens, die Folgefahrt hinter einem weiteren Verkehrsteilnehmer, das Annähern an weitere Verkehrsteilnehmer oder an Stauenden und Überholvorgänge. Zusätzlich gibt es Ein- und Ausfädelsituationen mit unterschiedlichen Ausprägungen, beispielsweise das Reißverschlussverfahren mit mehreren zu beachtenden Verkehrsteilnehmern oder Ausfädeln auf einen Ausfädelstreifen. Zu den größten Herausforderungen zählen das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer, Arbeitsstellen, Staus und plötzlich auftretende Hindernisse, beispielsweise verlorene Ladung, Reifenteile oder Fahrzeugteile und Personen nach einem Unfall. Die Beherrschbarkeit dieser pathologischen Szenarien wirkt sich direkt auf die Verfügbarkeit der automatisierten Fahrzeugführung in dieser Domäne aus. Auch in diesen Szenarien muss ein sicherer Zustand erhalten bleiben.

Landstraßen

Auf Landstraßen sind die Absolutgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer geringer als auf Fernstraßen, jedoch können Fahrräder und andere, langsamere Fahrzeuge am Verkehr teilnehmen. Kuppen, schlecht einsehbare Kurven, Kurven mit geringen Radien, Kreuzungen und Einmündungen erfordern eine höhere Aufmerksamkeit des Fahrers im Vergleich zu Fernstraßen. Verschmutzungen, unerwartete Hindernisse, wie zum Beispiel Wildwechsel, Lichtsignalanlagen und das Fehlen von Seitenstreifen, erhöhen die Anforderungen zusätzlich. Dadurch ist die Menge an unterschiedlichen Szenarien auf Landstraßen höher und die Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung steigen. Beispielsweise sind Abbiegesituationen mit Gegenverkehr möglich. Auch hier schränkt die Beherrschbarkeit der pathologischen Szenarien die Verfügbarkeit der automatisierten Fahrt ein. Analog zu Fernstraßen muss bei der Durchfahrt von allen Szenarien ein sicherer Zustand erhalten bleiben.

Innerstädtische Straßen

Im städtischen Straßenverkehr werden Fahrer und Fahrzeugführungssysteme noch stärker gefordert, da längerfristige ereignisarme Phasen der Fahrt seltener sind. Im Folgenden werden die Besonderheiten dieser Umgebung detaillierter skizziert, um daraus auf die Anforderungen an ein vollständig automatisiertes Fahrzeug für den städtischen Straßenverkehr zu schließen. Eine Übertragung der Anforderungen auf Landstraßen und Fernstraßen ist möglich, da dort vorkommende Situationen eine Teilmenge der städtischen Situationen ausmachen.

Das städtische Straßennetz setzt sich aus Autobahnen, Bundesstraßen, Haupt- und Nebenstraßen zusammen. Städtische Autobahnen unterscheiden sich in der Regel nicht von Autobahnen außerorts. Bundesstraßen und Hauptstraßen in städtischen Umgebungen können eine erhöhte Anzahl an Kreuzungen und Einmündungen aufweisen und sind somit strukturell



Abbildung 6.1: Vereinfachtes Straßennetz der Braunschweiger Innenstadt; Kartenmaterial von © OpenStreetMap (and) contributors, CC-BY-SA

komplexer als vergleichbare Straßen außerorts. Häufig sind diese nicht nur einstreifig, sondern mehrstreifig je Richtung ausgeführt. Eine bauliche Trennung der Richtungsfahrbahnen ist möglich, aber nicht die Regel. An Einmündungen und Kreuzungen können zusätzliche Fahrstreifen zum Ein- und Ausfädeln sowie für Abbiegevorgänge vorhanden sein. In Wohngebieten sind die Straßen häufig schmaler und Fahrbahnmarkierungen zur visuellen Unterstützung der Fahrer fehlen.

In *Abbildung 6.1* ist das Straßennetz der Braunschweiger Innenstadt abgebildet. Im linken Bereich befindet sich die Autobahn A391 (blau). Einen Teil des Stadtrings bilden die drei Bundesstraßen B1, B4 und B248 (rot). Orange hervorgehoben sind mehrstreifige Hauptstraßen, gelbe Straßen stehen für einstreifige Hauptstraßen. Alle übrigen befahrbaren Straßen sind grau dargestellt.

Auf Bundes-, Haupt- und Nebenstraßen gibt es stellenweise Sonderfahrstreifen und Haltestellen für besondere Verkehrsteilnehmer, wie Busse, Straßenbahnen, Taxis und Einsatzfahrzeuge. Für Straßenbahnen können in der Fahrbahn Schienen sowohl in normalen Fahrstreifen als auch auf Sonderfahrstreifen verlegt sein. Weitere Besonderheiten sind Einbahnstraßen und für den allgemeinen Verkehrsteilnehmer dauerhaft oder zeitlich begrenzt gesperrte Bereiche. Mehrstreifige Kreuzungen sowie Einmündungen und Kreisverkehre erhöhen die

Anzahl der Szenarien. Ohne Verkehrsinfrastruktur, wie zum Beispiel Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen, wäre ein geregelter Verkehr nur schwer möglich. Auch Fahrradwege und Fußgängerüberwege, die gedacht sind, um schwächere Verkehrsteilnehmer zu schützen, müssen beachtet werden.

Das Straßennetz ist in der Regel nicht statisch, sondern es unterliegt Veränderungen. Diese können kurzzeitig auftreten, wie zum Beispiel bei Sperrungen einzelner Straßen für Veranstaltungen oder bei Tagesbaustellen, oder längerfristig andauern, beispielsweise bei Sanierungsarbeiten. Solche Veränderungen werden von Fahrern normalerweise erkannt und bewältigt.

Bei einer Fahrt in einer städtischen Umgebung treten unterschiedliche Szenarien. Eine Fahrt beginnt üblicherweise mit dem Anfahren vom Abstellort des Fahrzeugs. Dies kann eine Garage, ein privater Parkplatz oder ein öffentlicher Parkplatz sein. Das Fahrzeug muss in den fließenden Verkehr einfädeln oder auf eine öffentliche Straße abbiegen. Unter Umständen hat dies durch rückwärtiges Ausparken zu erfolgen. Auf einer öffentlichen Straße angekommen, kann das vollständig automatisierte Fahrzeug allein unterwegs sein oder einem anderen Fahrzeug folgen. Weitere Verkehrsteilnehmer können vor dem vollständig automatisierten Fahrzeug auftauchen oder sich entfernen. Gegenstände können auf dem aktuellen Fahrstreifen liegen. An Kreuzungen und Lichtsignalanlagen muss angehalten und angefahren werden. Neben dem Straßennetz - der straßenbaulichen Infrastruktur² - sind Mittel zur Verkehrsleitung notwendig, die als Element einer Szene im Folgenden beschrieben werden.

Straßennetz und verkehrstechnische Infrastruktur

Ein automatisiertes Fahrzeug soll ohne spezielle Infrastruktur am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen können (bordautonom, *Kapitel 1.3.2*). Daher werden die gleiche straßenbauliche und die gleiche verkehrstechnische Infrastruktur von allen Verkehrsteilnehmern genutzt. Die verschiedenen Arten von Fahrstreifen sind meist durch Fahrbahnmarkierungen und Verkehrszeichen erkennbar. Zusätzlich ist in städtischen Umgebungen eine Randbebauung vorhanden, teils durch Radfahrer- und Fußgängerwege, durch Parkstreifen mit und ohne geparkte Fahrzeuge, Haltestellen für den öffentlichen Nahverkehr oder durch Gebäude. Die Randbebauung und Fahrstreifenmarkierungen dienen zur grundsätzlichen Leitung des Verkehrs. Zusammen mit Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen wird der Verkehrsfluss geregelt. Neben diesen Mitteln zur Verkehrsleitung kann es in Sonderfällen zum Einsatz von Lotsen und Polizisten kommen, beispielsweise an Schulen, bei Verkehrsunfällen oder bei Ausfall von Lichtsignalanlagen. Auch Umleitungen werden durch Schilder signalisiert und vor und in Arbeitsstellen können zeitlich begrenzte zusätzliche Lichtsignalanlagen verwendet werden. Die Herausforderung für automatisierte Fahrzeuge hinsichtlich der Verkehrsinfrastruktur besteht in der maschinellen Wahrnehmung dieser für den Menschen geschaffenen Merkmale und Abläufe. Alle genannten Merkmale können in einer digitalen Karte eingetragen sein und/oder über Kommunikationseinrichtungen an das Fahrzeug übermittelt werden. Da weder vollständige Karten, noch überall verfügbare Kommunikationseinrichtungen angenommen werden können, wird im Folgenden von einem Betrieb mit bordeigener Technologie ausgegangen. Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und die Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation sind bisher noch in der Erprobung und werden nicht sofort flächendeckend zur Verfügung

²Auch entwurfstechnische Infrastruktur genannt

stehen (Bley u. a., 2011; Saust u. a., 2012). Eine Nutzung ist daher nur optional, weil die Verfügbarkeit bisher nicht garantiert werden kann.

Straßenverhältnisse

Die Fahrbahnbeläge sind in städtischen Umgebungen in der Regel Teerdecken und/oder Kopfsteinpflaster. Seltener, vor allem in Arbeitsstellen, kann auch Kies oder Sand als Fahrbahnbelag vorhanden sein. Verschmutzungen, Beschädigungen, Ausbesserungen, Feuchte, Nässe, Schnee und Eis verringern die Haftreibung der Reifen und verlängern den Bremsweg. Eine Zusammenfassung dieser Merkmale und Eigenschaften findet sich in Dickmanns (2007, Anhang A.1.3). Die Straßenverhältnisse sind außerdem von den Witterungsbedingungen abhängig. Ein automatisiertes Fahrzeug muss die aktuellen Straßenverhältnisse erfassen und bei seinen Fahrentscheidungen entsprechend berücksichtigen.

Zustand der Infrastruktur

Neben der generellen Verfügbarkeit spielt der Zustand der Infrastruktur eine weitere Rolle für automatisierte Fahrzeuge. Menschen können fehlende, verschmutzte, beschädigte oder verschlissene Infrastrukturelemente gut interpretieren und deuten. Sie sind auch in der Lage, widersprüchliche Verkehrszeichen und Markierungen als solche zu erkennen und entsprechend zu reagieren.

Für ein automatisiertes Fahrzeug entstehen dadurch jedoch Herausforderungen, die mit heutiger Technologie noch nicht gelöst werden können. Dies haben intensive Diskussionen im Rahmen eines Workshops im Grundlagenprojekt Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens (82.0623/2014) der Bundesanstalt für Straßenwesen in Braunschweig im Jahr 2016 gezeigt. Schlaglöcher und weitere Fahrbahnschäden, fehlende und nicht wahrnehmbare Markierungen und fehlende und nicht wahrnehmbare Verkehrszeichen wurden auf diesem Workshop als besonders herausfordernd diskutiert. Dennoch muss ein automatisiertes Fahrzeug auch damit zurecht kommen.

Umweltbedingungen

Unterschiedliche Witterungsbedingungen wie Niederschlag oder Nebel können die Wahrnehmungsfähigkeit sowohl des menschlichen Auges als auch der elektronischen Sensoren beeinflussen. Niedrige oder hohe Temperaturen können sich zusätzlich auf die Umfeldsensorik eines automatisierten Fahrzeugs auswirken (Dickmanns, 2007, Anhang A.1.3). Dickmanns (2007, 2.1.4.2 und 4.1) stellt heraus, dass sich Lichtverhältnisse über die Zeit verändern und ebenfalls einen großen Einfluss auf die Umfeldwahrnehmung mit bildgebenden Kameras haben. Die Lichtverhältnisse wirken sich auch auf weitere optisch arbeitende Sensoren, wie zum Beispiel Infrarotsensorik, aus. Sie verändern sich im Tages- und Nachtverlauf und je nach Jahreszeit und Bewölkung. Die Witterungsbedingungen und Lichtverhältnisse können zu einer eingeschränkten Leistungsfähigkeit resultierend aus einem eingeschränkten Sensorsichtbereich, einer verminderten Anzahl von wahrgenommenen Objekten und einer verminderten Qualität der Sensorinformationen führen.

Verkehrsteilnehmer

Verkehrsteilnehmer unterscheiden sich vor allem durch ihre unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Größen. Während Lkw die Fahrstreifen in der Regel vollständig ausfüllen oder sogar überbeanspruchen, benötigen Zweiräder deutlich weniger Raum. Besonderes Augenmerk gilt Fahrrädern, da diese bei Dämmerung oder Dunkelheit häufig nicht über

lichtstarke Beleuchtung oder Fahrtrichtungsanzeiger verfügen. Gleiches gilt für Fußgänger, deren Intention, beispielsweise beim Überqueren einer Straße, schwer zu erkennen sein kann.

Für alle Verkehrsteilnehmer ist anzunehmen, dass sich diese nicht an die Straßenverkehrsordnung halten und somit ein unerwartetes Verhalten zeigen. Für Baufahrzeuge und Einsatzfahrzeuge gelten zudem andere Regeln und durch ihre Präsenz reagieren weitere Verkehrsteilnehmer oft ungewöhnlich. So kann es vorkommen, dass zur Bildung einer Rettungsgasse durchgezogene Linien oder rot zeigende Lichtsignalanlagen missachtet werden müssen.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Für automatisierte Fahrzeuge gelten bisher die gleichen Gesetze und Verordnungen, wie für manuell gefahrene Fahrzeuge. Entsprechend müssen sich vollständig automatisierte Fahrzeuge an die Straßenverkehrsordnung halten (BMVI, 2014). Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind somit vorgegeben. Auf die Zulassung von automatisierten Fahrzeugen wurde bereits in *Kapitel 1.3.7* eingegangen.

Zusammenfassung

Als Resultat der Analyse des Einsatzbereichs ergeben sich weitere Anforderungen, die eine Verfeinerung der Anforderungen aus *Tabelle 1.4* und *Tabelle 3.1* sind. In *Tabelle 6.1* sind diese aufgelistet. Die Tabellen mit den Anforderungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vollständigkeit für die Anforderungen kann nur dann erreicht werden, wenn der gesamte Einsatzbereich, alle Verkehrsteilnehmer, alle Umweltbedingungen und alle daraus resultierenden, möglichen Szenarien beschrieben werden. Dies erscheint nicht möglich und entspricht der von Maurer (2014) bezeichneten offene Menge an Szenarien beziehungsweise Situationen. Vielmehr muss eine repräsentative Menge an Szenarien identifiziert werden, die ein automatisiertes Fahrzeug beherrschen muss. Hierfür eignen sich die im folgenden Kapitel beschriebenen pathologischen Szenarien.

Nr.	Anforderung
A01	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss eine Fahrmission in seinem Einsatzgebiet ohne menschlichen Eingriff erledigen.
–A01.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur in seinem Einsatzgebiet betrieben werden können.
–A01.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die Insassen nicht gefährden.
–A01.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die weiteren Verkehrsteilnehmer nicht gefährden.
A02	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Umfeld des Fahrzeugs wahrnehmen.
–A02.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Straßennetz wahrnehmen (straßenbauliche Infrastruktur).
–A02.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die verkehrstechnische Infrastruktur wahrnehmen.

–A02.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug kann die informationstechnische Infrastruktur nutzen.
–A02.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Straßenverhältnisse wahrnehmen.
–A02.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Umweltbedingungen wahrnehmen.
–A02.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die weiteren Verkehrsteilnehmer wahrnehmen.
A03	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen planen.
A04	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen ausführen.
–A04.1	Als letzte Aktion im Betrieb muss ein vollständig automatisiertes Fahrzeug in den Stillstand abbremsen.
A05	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich selbst wahrnehmen und benötigt eine Selbstrepräsentation, um seine eigenen Systemgrenzen im Betrieb zu ermitteln.
–A05.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Fahrzeugzustand überwachen.
A06	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Ladung überwachen.
A07	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Insassen unterstützen.
A08	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss internationale und nationale Gesetze, Verordnungen und Richtlinien umsetzen.
–A08.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die deutsche Straßenverkehrsordnung befolgen.

Tabelle 6.1: Resultierende Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf aus den Rahmenbedingungen, dem Stand der Technik und der Analyse der Einsatzumgebung. Geänderte und im Vergleich zu *Tabelle 3.1* hinzugekommene Anforderungen sind grau hinterlegt. Untergeordnete Gliederungsebenen bedeuten eine Verfeinerung der übergeordneten Anforderungen.

6.1.2 Pathologische Szenarien im städtischen Straßenverkehr

Die Betrachtung von pathologischen Szenarien soll zu funktionalen Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug führen, die nur durch eine Betrachtung des Standardfalls nicht erhoben werden können. Eine Analyse von Verkehrsunfällen und Feldstudien kann hier ebenfalls genutzt werden, jedoch würden damit nur die für den Menschen herausfordernden Szenarien identifiziert werden. Ein automatisiertes Fahrzeug kann aufgrund der spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Technologie nicht direkt mit dem Menschen verglichen werden. Manche für den Menschen herausfordernde Szenarien können für das vollständig automatisierte Fahrzeug relativ leicht zu lösen sein. Andererseits können Szenarien, in denen

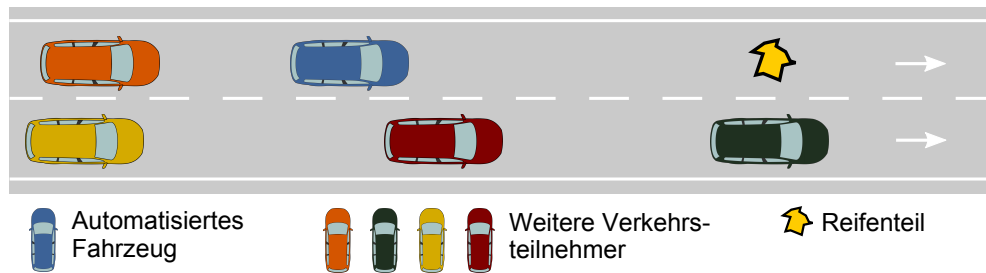


Abbildung 6.2: Reifenteil auf einem Fahrstreifen

der Mensch keine Probleme hat, für das vollständig automatisierte Fahrzeug besonders herausfordernd sein.

6.1.2.1 Reifenteil auf einem Fahrstreifen

Abbildung 6.2 zeigt eine Szene, in der ein Reifenteil vor dem automatisierten Fahrzeug auf dem Fahrstreifen liegt. Das Besondere an dem zugehörigen Szenario ist die Notwendigkeit der rechtzeitigen Wahrnehmung des Reifenteils und der richtigen Reaktion darauf. Wesentliche Faktoren für die rechtzeitige Wahrnehmung sind die Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs und der Sichtbereich der Umfeldsensorik abhängig von den aktuellen Umweltbedingungen. Die folgenden Anforderungen resultieren aus diesem pathologischen Szenario:

A03.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass es vor einem auf dem eigenen Fahrstreifen vorhandenen Hindernis kollisionsfrei anhalten kann.
A05.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seinen Sensorsichtbereich kennen.
A05.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine Reaktionszeit auf wahrgenommene Hindernisse kennen.
A05.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine aktuell erreichbare Verzögerung kennen.

6.1.2.2 Widersprüchliche Tempolimits im Bereich von Arbeitsstellen

Ein weiteres pathologisches Szenario ist die Erkennung des aktuell gültigen Tempolimits im Zusammenhang mit Arbeitsstellen. Dieses steht beispielhaft für eine Menge von Szenarien, bei denen die Wahl einer sicheren Geschwindigkeit herausfordernd ist. In *Abbildung 6.3* sind die vier Zeitpunkte t_1 bis t_4 dargestellt, in denen sich das vollständig automatisierte Fahrzeug (blau) befindet. Zum Zeitpunkt t_1 wird eine Geschwindigkeitsbeschränkung (30 km/h) erkannt, die durch ein Verkehrszeichen zur Absicherung einer Arbeitsstelle auf einem Fahrstreifen angezeigt wird. Das vollständig automatisierte Fahrzeug passiert daraufhin das Verkehrszeichen. Zum Zeitpunkt t_2 wird eine Geschwindigkeitsbeschränkung (50 km/h) erkannt, die durch ein dauerhaft installiertes Verkehrszeichen angezeigt wird. Zum Zeitpunkt t_3 wird die Arbeitsstelle passiert. Zum Zeitpunkt t_4 ist der Arbeitsstellenbereich beendet. Eine Auflösung oder Änderung der Geschwindigkeitsbeschränkung zu diesem Zeitpunkt gibt es nicht. Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf zum Zeitpunkt t_3 nicht mit überhöhter Geschwindigkeit an der Arbeitsstelle vorbeifahren. Das Fahrzeugführungssystem

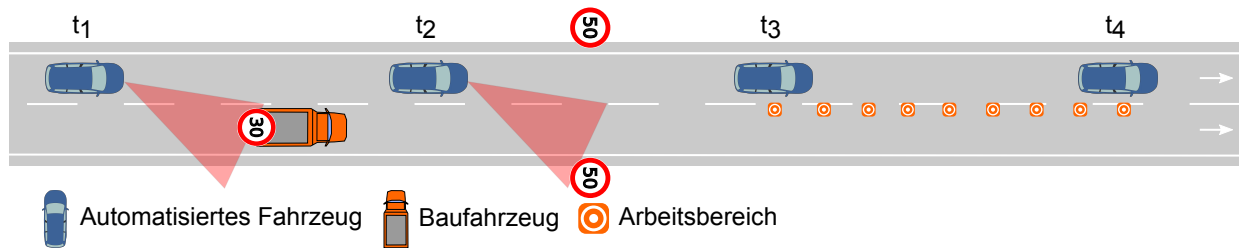


Abbildung 6.3: Widersprüchliche Tempolimits im Bereich einer Arbeitsstelle

muss die Elemente in diesem Szenario daher richtig wahrnehmen und erkennen, dass die Geschwindigkeitsbeschränkung zu t_2 (50 km/h) erst gilt, sobald die Arbeitsstelle vollständig passiert wurde. Ein Verhalten gemäß BMVI (2014) erfordert daher die Erkennung der Geschwindigkeitsbeschränkung und der Situation. Aufgrund der geltenden Bestimmungen für Arbeitsstellen ist es nicht erforderlich, weitere Verkehrszeichen zur Absicherung dieser einzusetzen. Die folgenden neuen Anforderungen resultieren aus diesem pathologischen Szenario:

A02.2.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Bereich einer Arbeitsstelle wahrnehmen.
A02.7	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Bedeutung von Elementen einer Szene verstehen.

6.1.2.3 Bildung einer Rettungsgasse oder eines Rettungswegs

Im städtischen Bereich gibt es sowohl Rettungswege, die nicht blockiert werden dürfen, als auch Einsatzfahrzeuge, die bevorrechtigt fahren dürfen. In diesem pathologischen Szenario, dargestellt in *Abbildung 6.4*, nähert sich ein Rettungsfahrzeug von hinten auf dem Fahrstreifen des automatisierten Fahrzeuges. Damit dieses nicht blockiert wird, muss eine Rettungsgasse gebildet werden. Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss daher an den rechten Rand des Fahrstreifens fahren und anhalten, sodass links neben ihm genügend Raum für das Rettungsfahrzeug zur Verfügung steht. Aus diesem pathologischen Szenario resultieren die folgenden neuen Anforderungen:

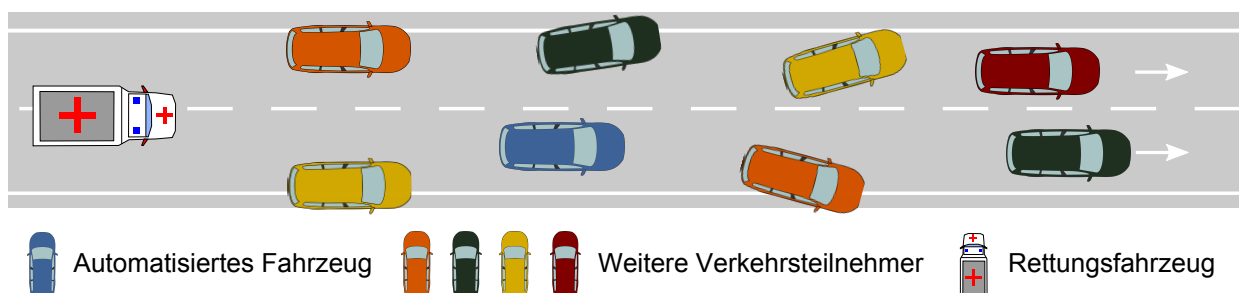


Abbildung 6.4: Bildung einer Rettungsgasse

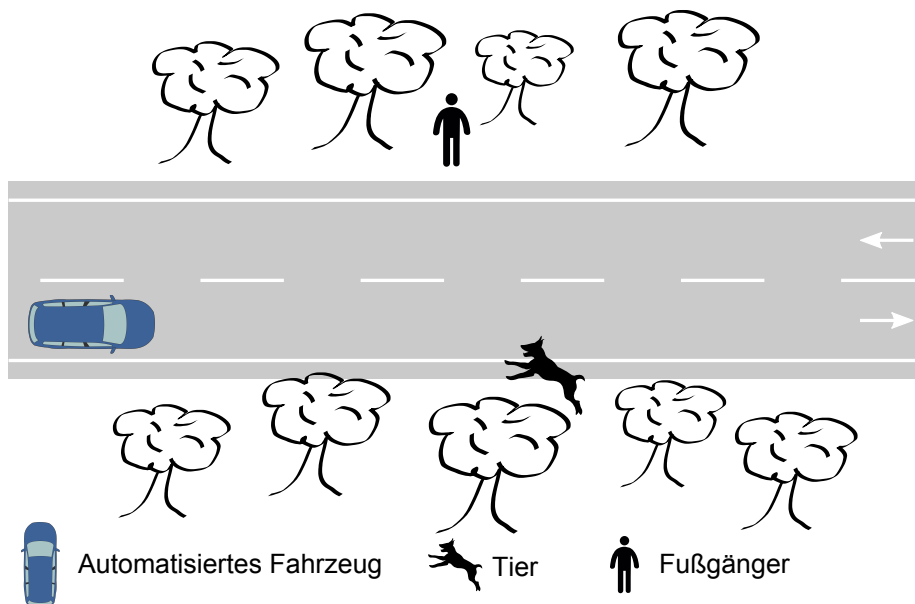


Abbildung 6.5: Tier überquert Fahrbahn

A02.6.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Einsatzfahrzeuge als solche wahrnehmen.
A03.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Einsatzfahrzeugen den erforderlichen Raum zur Verfügung stellen.
A04.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss auf engem Raum mit sehr geringen Abständen zu weiteren Verkehrsteilnehmern manövrieren.

6.1.2.4 Wildwechsel/Tiere auf der Straße

Eine Szene aus einem weiteren pathologischen Szenario ist in *Abbildung 6.5* dargestellt. Das vollständig automatisierte Fahrzeug fährt auf einer Straße mit einer dichten Randbebauung auf beiden Seiten neben der Fahrbahn. Am Straßenrand steht ein Tier, das möglicherweise die Straße überqueren möchte, beispielsweise ein Hund, der zu seinem Herrchen läuft. Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss entsprechend erkennen, ob das Tier zu einer Gefahr werden kann, oder ob ein Passieren möglich ist. Hierzu ist zunächst die Wahrnehmung und Klassifikation des Tieres erforderlich. Bei Kleintieren, bei denen es nicht zu einer Gefährdung von Insassen kommt, soll nicht abgebremst werden. Dies führt laut einem Urteil des Oberlandesgerichts Karlsruhe vom 13.07.1987 - Aktenzeichen 1 U 288/86 - zu einem Verstoß gegen §4 StVO (Bundesgesetzblatt, 2013)³. Bei zusätzlich schlechten Witterungsbedingungen und Lichtverhältnissen, beispielsweise in der Dämmerung im Herbst, ist dies selbst für den Menschen schwierig. Ein sicheres Passieren ist somit nur mit einer geringen Geschwindigkeit möglich. Es stellt sich die Frage nach einer sicheren Höchstgeschwindigkeit in diesem

³Zusammenfassung des Urteils: http://www.kostenlose-urteile.de/OLG-Karlsruhe_1-U-28886_Auffahrunfall-nach-Vollbremsung-wegen-Wildente-Haftungsanteil-des-Auffahrenden-ueberwiegt.news17284.htm, abgerufen am 23.03.2016

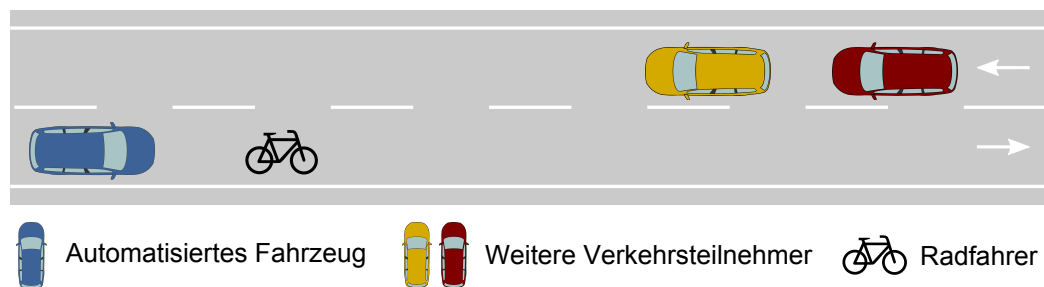


Abbildung 6.6: Überholen eines Radfahrers

Szenario. Aus diesem pathologischen Szenario resultieren die folgenden neuen Anforderungen:

A02.6.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Tiere wahrnehmen, bei denen bei einer Kollision eine Gefährdung für die Insassen besteht.
A03.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten planen.

6.1.2.5 Überholen eines Radfahrers

Ein häufiges Szenario ist das Überholen eines oder mehrerer Radfahrer in der Stadt (*Abbildung 6.6*). Radfahrer verfügen nicht über Fahrtrichtungsanzeiger und somit ist deren Intention über Handzeichen oder ihre Bewegungsrichtung zu ermitteln. Auf einer Straße mit nur einem Fahrstreifen je Richtung ist aufgrund des erforderlichen Sicherheitsabstandes zu einem Radfahrer der entgegenkommende Verkehr zu berücksichtigen. Hieraus ergeben sich mehrere neue Anforderungen:

A02.6.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Gesten von Radfahrern wahrnehmen.
A02.6.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss entgegenkommende Fahrzeuge wahrnehmen.
A03.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass entgegenkommende Fahrzeuge rechtzeitig wahrgenommen werden können.
A03.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Sicherheitsabstände zu anderen Verkehrsteilnehmern einhalten.

6.1.2.6 Plötzlich vor das Fahrzeug tretender Fußgänger

Im städtischen Raum sind die Fahrbahnränder häufig mit parkenden Fahrzeugen, Bepflanzung oder anderen Objekten versehen. Aus Lücken in dieser Randbebauung und zwischen parkenden Fahrzeugen können unvermittelt Personen auf die Fahrbahn treten (*Abbildung 6.7*). Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss hier, wie der Mensch auch, mit der gebotenen Vorsicht fahren und Kollisionen mit Fußgängern müssen verhindert werden. Dies resultiert in der folgenden neuen Anforderung:

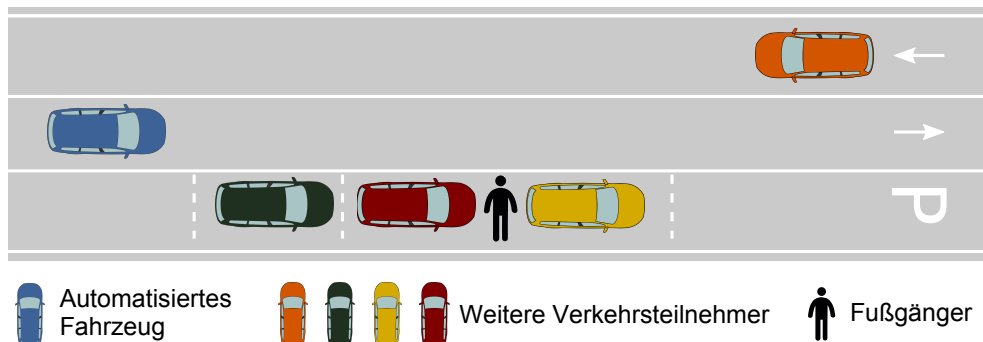


Abbildung 6.7: Fußgänger tritt plötzlich auf die Fahrbahn

- A03.3 | Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass unvermittelt auf die Fahrbahn tretende Personen rechtzeitig wahrgenommen werden können.

6.1.2.7 Person, die den Verkehr leitet

Im Bereich von Arbeitsstellen, im Bereich von Kreuzungen und bei Unfällen können Personen den Verkehr regeln, wenn keine anderen verkehrstechnischen Einrichtungen dies übernehmen können. Diese Szenarien haben ein erhöhtes Risiko und können zu Gefährdungen führen. Menschliche Fahrer und vollständig automatisierte Fahrzeuge müssen daher die Gesten von Personen wahrnehmen und verstehen. In der Szene in *Abbildung 6.8* ist es zwischen dem roten und grünen Fahrzeug zu einer Kollision gekommen. Dadurch ist die Kreuzung teilweise blockiert. Eine Person leitet den Verkehr, damit die weiteren Verkehrsteilnehmer die Kreuzung sicher durchfahren können. Das automatisierte Fahrzeug (blau) möchte die Kreuzung von links nach rechts überqueren und hätte eigentlich Vorfahrt. Die verkehrsleitende Person zeigt dem vollständig automatisierten Fahrzeug mit der Kelle an, dass dieses nicht in die Kreuzung einfahren darf. Erst wenn die verkehrsleitende Person dem vollständig automatisierten Fahrzeug die Einfahrt in die Kreuzung erlaubt, darf das Fahrzeug weiter fahren. Hieraus ergibt sich die folgende neue Anforderung:

- A02.6.5 | Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Gesten von Personen wahrnehmen.

6.1.2.8 Unfallflucht

Das vollständig automatisierte Fahrzeug kann unverschuldet in einen Unfall verwickelt sein. Es ist daher erforderlich, dass das vollständig automatisierte Fahrzeug diesen Unfall wahrnimmt und falls das Fahrzeug nicht steht, an einem sicheren Ort anhält. Des Weiteren ist eine Benachrichtigung des zuständigen Betreibers des Fahrzeugs erforderlich. Außerdem kann ein Notruf erforderlich sein. Aus diesem pathologischen Szenario leiten sich die folgenden Anforderungen ab:

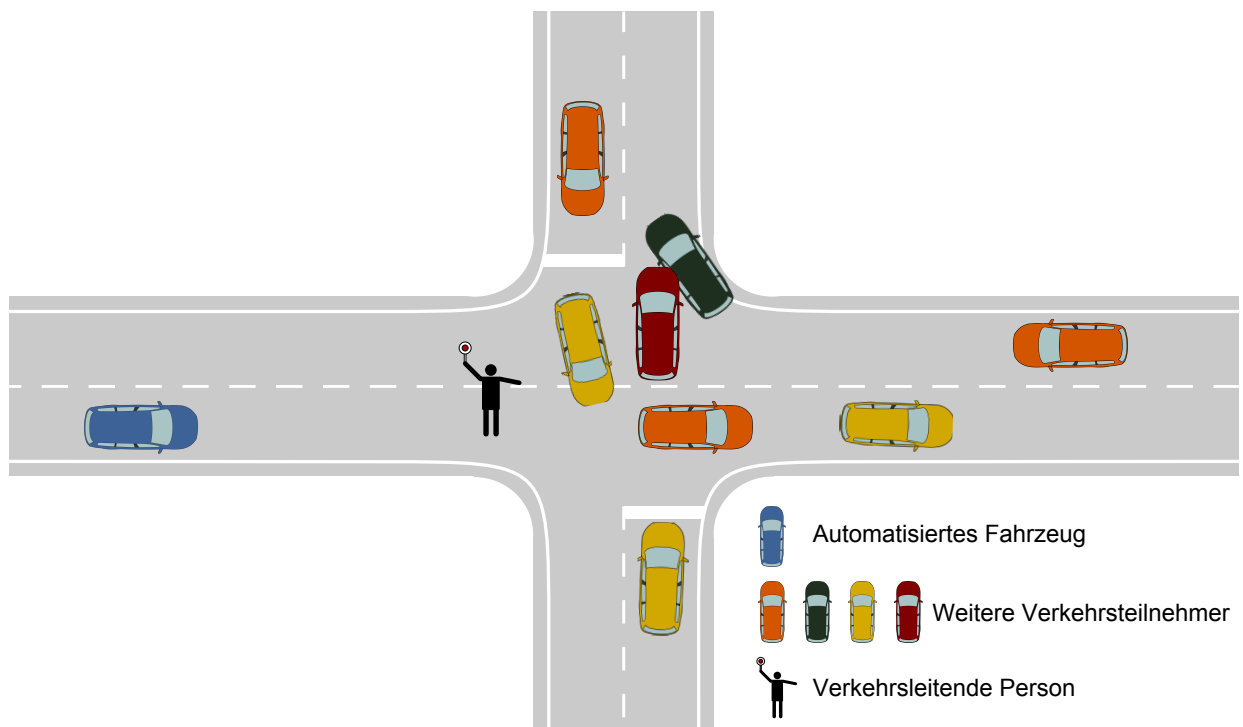


Abbildung 6.8: Person, die den Verkehr leitet

A02.3.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss mit einer Rettungsleitstelle kommunizieren können.
A05.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Kollisionen mit sich selbst wahrnehmen.

6.1.3 Zusammenfassung

In *Tabelle 6.2* sind die Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug zusammen gefasst.

Nr.	Anforderung
A01	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss eine Fahrmission in seinem Einsatzgebiet ohne menschlichen Eingriff erledigen.
-A01.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur in seinem Einsatzgebiet betrieben werden können.
-A01.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die Insassen nicht gefährden.
-A01.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die weiteren Verkehrsteilnehmer nicht gefährden.

A02	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Umfeld des Fahrzeugs wahrnehmen.
–A02.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Straßennetz wahrnehmen (straßenbauliche Infrastruktur).
–A02.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die verkehrstechnische Infrastruktur wahrnehmen.
– –A02.2.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Bereich einer Arbeitsstelle wahrnehmen.
–A02.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die informationstechnische Infrastruktur nutzen.
– –A02.3.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss mit einer Rettungsleitstelle kommunizieren können.
–A02.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Straßenverhältnisse wahrnehmen.
–A02.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Umweltbedingungen wahrnehmen.
–A02.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die weiteren Verkehrsteilnehmer wahrnehmen.
– –A02.6.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Einsatzfahrzeuge als solche wahrnehmen.
– –A02.6.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Tiere wahrnehmen, bei denen bei einer Kollision eine Gefährdung für die Insassen besteht.
– –A02.6.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Gesten von Radfahrern wahrnehmen.
– –A02.6.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss entgegenkommende Fahrzeuge wahrnehmen.
– –A02.6.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Gesten von Personen wahrnehmen.
–A02.7	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Bedeutung von Elementen einer Szene verstehen.
A03	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen planen.
–A03.1	Das automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass es vor einem auf dem eigenen Fahrstreifen vorhandenen Hindernis kollisionsfrei anhalten kann.

–A03.2	Das automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass entgegenkommende Fahrzeuge rechtzeitig wahrgenommen werden können.
–A03.3	Das automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass unvermittelt auf die Fahrbahn tretende Personen rechtzeitig wahrgenommen werden können.
–A03.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Einsatzfahrzeugen den erforderlichen Raum zur Verfügung stellen.
–A03.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten planen.
–A03.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Sicherheitsabstände zu anderen Verkehrsteilnehmern einhalten.
A04	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen ausführen.
–A04.1	Als letzte Aktion im Betrieb muss ein vollständig automatisiertes Fahrzeug in den Stillstand abbremsen.
–A04.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss auf engem Raum mit sehr geringen Abständen zu weiteren Verkehrsteilnehmern manövrieren können.
A05	Ein vollständig automatisiertes Fahrzeug muss sich selbst wahrnehmen und benötigt eine Selbstrepräsentation, um seine eigenen Systemgrenzen im Betrieb zu ermitteln.
–A05.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Fahrzeugzustand überwachen.
–A05.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seinen Sensorsichtbereich kennen.
–A05.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine Reaktionszeit auf wahrgenommene Hindernisse kennen.
–A05.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine aktuell erreichbare Verzögerung kennen.
–A05.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Kollisionen mit sich selbst wahrnehmen.
A06	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Ladung überwachen.
A07	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Insassen unterstützen.
A08	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss internationale und nationale Gesetze, Verordnungen und Richtlinien umsetzen.

–A08.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die deutsche Straßenverkehrsordnung befolgen.
--------	--

Tabelle 6.2: Resultierende Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf aus den Rahmenbedingungen, dem Stand der Technik, der Analyse der Einsatzumgebung und den pathologischen Szenarien. Geänderte und im Vergleich zu *Tabelle 6.1* hinzugekommene Anforderungen sind grau hinterlegt. Untergeordnete Gliederungsebenen bedeuten eine Verfeinerung der übergeordneten Anforderungen.

Die Betrachtung von pathologischen Szenarien hat die bereits in *Tabelle 6.1* enthaltenen Anforderungen weiter verfeinert. Die Auflistung in *Tabelle 6.2* erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Betrachtung der pathologischen Szenarien hat zu einer sinnvollen Erweiterung der ursprünglichen Anforderungen geführt. Weitere pathologische Szenarien können die Anforderungen erweitern und verfeinern. An dieser Stelle stellt sich die Frage, ob eine Vollständigkeit erreicht werden kann und wie diese nachgewiesen werden kann. Eine Antwort auf diese Frage wird in der vorliegenden Arbeit nicht gegeben. Das hier gewählte Vorgehen und die resultierenden Anforderungen reichen für die folgenden Kapitel jedoch aus. Im folgenden Kapitel lassen sich ein Sollverhalten aus diesen Anforderungen ableiten, welches einen sicheren Betrieb im Straßenverkehr basierend auf dieser Menge an Szenarien ermöglichen soll.

6.2 Ableitung von allgemeinen Verhaltensregeln

Basierend auf den pathologischen Szenarien werden in diesem Kapitel allgemeine Verhaltensregeln für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf abgeleitet. Die bisher definierten Anforderungen in *Tabelle 6.2* dienen als Grundlage und lassen sich zu vier übergeordneten Verhaltensregeln zusammenfassen. Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss bei der Verhaltensplanung eine Minimierung

1. der Gefährdung von Personen,
2. der Gefährdung von Gütern,
3. von Verstößen gegen Verordnungen und Gesetze und
4. von Abweichungen von den eigenen Zielen

in dieser Reihenfolge priorisieren.

Zusätzlich zu diesen sind moralische Aspekte von Fahrentscheidungen zu beachten. Das moralisch korrekte Verhalten ist ein eigener Forschungsbereich ist, der beispielsweise von Ulbrich (2016, Kapitel 9), Gerdes und Thornton (2015) und Lin (2015) diskutiert wird. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Aspekt der Fahrentscheidungen nicht weiter berücksichtigt und nur durch die Anforderung A01.3.2 in *Tabelle 6.3* berücksichtigt. Als ein Teil des moralischen Verhaltens wird die Kooperation des automatisierten Fahrzeugs mit weiteren Verkehrsteilnehmern angesehen. Auch diese wird in der vorliegenden Arbeit nicht detailliert betrachtet, sondern resultiert in Anforderung A01.3.3 in *Tabelle 6.3*.

Nr.	Anforderungen an das Verhalten
A01.2.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss stets einen sicheren Halteplatz erreichen können, um Passagiere sicher aussteigen lassen zu können.
A01.3.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich für die weiteren Verkehrsteilnehmer vorhersehbar verhalten.
A01.3.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich moralisch korrekt verhalten.
A01.3.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich kooperativ verhalten.
A03.7	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss bei einer unvermeidlichen Kollision deren Folgen minimieren. ⁴
A03.8	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss mit den weiteren Verkehrsteilnehmern kooperieren.

Tabelle 6.3: Zusätzliche Anforderungen an das Verhalten des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf basierend auf dem generellen Sollverhalten

6.3 Ableitung von sicheren Zuständen in ausgewählten Szenarien⁵

Aus den Beschreibungen der Einsatzumgebung, der pathologischen Szenarien und des daraus resultierenden Sollverhaltens lassen sich sichere Zustände für ein vollständig automatisiertes Fahrzeug ableiten. In jeder Situation in jedem Szenario muss das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf in der Lage sein, einen sicheren Zustand zu erhalten.

Das Sicherheitsniveau einer Situation ist abhängig von der aktuellen Szene. Beispielsweise spielen die eigene Leistungsfähigkeit, die Dynamik der weiteren Verkehrsteilnehmer, die Beschaffenheit der Infrastruktur und die Umweltbedingungen eine Rolle.

Im Folgenden werden die sicheren Zustände beschrieben. Daraus lassen sich weitere Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf ableiten. Im Anschluss daran werden die Bedeutung der Geschwindigkeit des vollständig automatisierten Fahrzeugs und der Abstände zu beweglichen und nicht beweglichen Elementen einer Szene zusammenfassend betrachtet.

6.3.1 Sicherer Zustand für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf

Das vollständig automatisierte Fahrzeug ist in den folgenden Situationen im städtischen Straßenverkehr in einem sicheren Zustand:

1. Das Fahrzeug steht still. Von einem stehenden Fahrzeug geht aktiv keine unmittelbare Gefahr aus (siehe auch (Binfet-Kull u. a., 1998) und (Isermann u. a., 2002)). Die Sicherheit für Passagiere und andere Verkehrsteilnehmer hängt jedoch vom Standort des Fahrzeugs ab:

⁵Teile dieses Kapitels wurden bereits in englischer Sprache in Reschka und Maurer (2015) und in deutscher Sprache in Reschka (2015) veröffentlicht.

- *Fahrstreifen*: Im Stadtverkehr erscheint der Stillstand auf einem Fahrstreifen sicher, da in der Stadt die relative Geschwindigkeit von einem stehenden Fahrzeug zu den weiteren Verkehrsteilnehmern unter 70 km/h liegt⁶. Auf einer Autobahn oder auf Straßen außerorts kann es zu höheren relativen Geschwindigkeiten kommen. Dadurch ist ein Stillstand auf einem Fahrstreifen auf einer Autobahn oder außerhalb geschlossener Ortschaften kein sicherer Zustand. Auch in pathologischen Szenarien sind höhere Werte denkbar, beispielsweise bei illegalen Straßenrennen, Verfolgungsjagden, Rettungseinsätzen und erheblichen Verstößen gegen die Straßenverkehrsordnung (Maurer, 2016). In diesen Fällen ist der sichere Zustand ebenfalls der Stillstand, da als Alternative nur Ausweichmanöver zur Verfügung stehen, deren Risiko aufgrund der hohen Dynamik der genannten Szenarien vermutlich höher ist. Eine verlässliche Aussage darüber kann aufgrund fehlender Daten und Erfahrungen an dieser Stelle nicht gegeben werden.

Ist die Weiterfahrt nach einem Anhalten nicht mehr möglich, so muss das Fahrzeug entsprechend den geltenden Gesetzen abgesichert werden, zum Beispiel nach §15 StVO (Bundesgesetzblatt, 2013). Dies kann durch die Passagiere erfolgen. Die Absicherung des liegengebliebenen Fahrzeugs ist erschwert, falls kein Mensch an Bord ist, der dies übernehmen kann. Nur die am Fahrzeug angebrachte Beleuchtung ist zur Absicherung nutzbar. In Deutschland gibt es spezielle Vorschriften zur Absicherung eines liegengebliebenen Fahrzeugs, beispielsweise durch ein Warndreieck, das gut sichtbar hinter dem Fahrzeug aufgestellt werden muss. Es ist schwer vorstellbar, dass dies von einem vollständig automatisierten Fahrzeug selbständig erledigt wird. Daraus folgt, dass dies durch Menschen erledigt werden muss. Das Fahrzeug muss also entweder ständig überwacht werden, beispielsweise durch einen Teleoperator, oder von sich aus Hilfe anfordern, falls es zum Anhalten gezwungen ist und sein Abstellort abgesichert werden muss. Eine Gefährdung kann entstehen, falls das vollständig automatisierte Fahrzeug eine Rettungsgasse oder einen Rettungsweg blockiert. In diesem Fall darf das vollständig automatisierte Fahrzeug nicht an dieser Stelle anhalten, da in solchen Bereichen häufig ein absolutes Halteverbot gilt.

- *Kreuzungsbereich*: Bleibt das vollständig automatisierte Fahrzeug auf einer Kreuzung oder beim Abbiegen liegen, kann es zu Staus oder anderen Verkehrsbehinderungen kommen. Es besteht jedoch meist kein Unterschied zu Fahrstreifen, da keine anderen Gefährdungen auftreten. Ein Sonderfall tritt ein, falls die Kreuzung vollständig durch das vollständig automatisierte Fahrzeug blockiert wird. In einem solchen Fall könnten ebenfalls Rettungswege blockiert werden.
- *Seitenstreifen oder Fahrbahnrand bei fehlendem Seitenstreifen, Parkplatz, Nothaltebucht oder ähnlicher Standort*: Bleibt ein vollständig automatisiertes Fahrzeug auf dem Seitenstreifen, am Fahrbahnrand oder an einem ähnlichen Standort liegen, muss das Fahrzeug entsprechend der geltenden Gesetze abgesichert werden.

⁶Dem Autor der vorliegenden Arbeit sind keine Veröffentlichungen zu einem numerischen Wert für eine sichere maximale Relativgeschwindigkeit bekannt. In der vorliegenden Arbeit wird von 70 km/h als sichere relative Geschwindigkeit ausgegangen, da dies aufgrund der Erfahrungen aus dem Projekt Stadtpilot ein realistischer Wert ist.

Der Abstellort ist jedoch sicherer als ein Fahrstreifen, da die relativen Geschwindigkeiten zu anderen Verkehrsteilnehmern auf den Fahrstreifen zwar ähnlich sind, sich aber meist keine Fahrzeuge auf dem Seitenstreifen von hinten nähern. Falls doch Fahrzeuge auf dem Seitenstreifen fahren, fahren diese mit geringerer Geschwindigkeit und somit können die Passagiere das vollständig automatisierte Fahrzeug sicher verlassen.

2. Das vollständig automatisierte Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen mit den vorgeschriebenen oder aufgrund der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs auch größeren Sicherheitsabständen zu anderen Verkehrsteilnehmern und mindestens mit der minimal vorgeschriebenen Geschwindigkeit, beziehungsweise höchstens mit der maximal erlaubten oder aufgrund der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs maximal möglichen Geschwindigkeit. Das vollständig automatisierte Fahrzeug kennt seine eigene Leistungsfähigkeit und kann daher Systemgrenzen selbständig erkennen. Im Fehlerfall oder bei einem Verlassen der Systemgrenzen kann ein sicherer Zustand durch ein Anhalten erhalten bleiben, falls die Sichtbarkeit des Fahrzeugs für andere Verkehrsteilnehmer gegeben ist (siehe oben). Es ist auch vorstellbar, dass während der Fahrt an einen Teleoperator übergeben wird, der das Fahrzeug ferngesteuert an einen sicheren Standort fahren kann.
3. Das vollständig automatisierte Fahrzeug durchfährt eine Kreuzung oder einen Kreisverkehr oder biegt ab. Beherrscht das Fahrzeug die Situation und die aktuell geltenden Vorfahrtregeln, so sind diese Manöver sicher. Erreicht das Fahrzeug dabei seine Systemgrenzen, so kann es mit reduzierter Geschwindigkeit und Signalisierung für die anderen Verkehrsteilnehmer weiterfahren.

Die wesentliche Herausforderung zur Erhaltung eines sicheren Zustands ist der fehlende Mensch zur Übernahme der Fahraufgaben. Bei Ereignissen, die das Risiko erhöhen, kann nicht an diesen übergeben werden und der Stillstand kann in vielen Situationen ein Risiko bergen, da das Fahrzeug nicht sofort manuell bewegt werden kann. Eine Lösung könnte das teleoperierte Fahren sein, bei dem eine Kommunikationsverbindung zum Fahrzeug bestehen muss, die zur Meldung eines Problems des Fahrzeugs und zur Fernsteuerung des Fahrzeugs genutzt wird. Ist ein Anhalten erforderlich, so muss dies den weiteren Verkehrsteilnehmern entsprechend signalisiert werden. Eine Absicherung des Fahrzeugs durch einen Menschen ist hier nicht immer möglich.

Das Blockieren von Rettungsfahrzeugen und Rettungswegen auf einstreifigen Straßen und bei Zufahrten für Rettungsfahrzeuge vor Gebäuden und anderen Einrichtungen stellt einen Sonderfall dar. Das Blockieren kann dazu führen, dass Rettungsaktionen verzögert und erschwert werden. Untersuchungen, die die Häufigkeit solcher Situationen belegen, sind dem Autor der vorliegenden Arbeit nicht bekannt. Daher kann hier keine Aussage getroffen werden, ob dieser Fall explizit berücksichtigt werden muss oder nicht. Im Folgenden wird jedoch davon ausgegangen, dass ein Anhalten auf Rettungswegen und das Blockieren von Rettungsfahrzeugen nicht akzeptabel sind. Nicht automatisierte Fahrzeuge können zwar ebenfalls liegenbleiben, es ist durch den vorhandenen Fahrer jedoch einfacher das Fahrzeug schnell und unkompliziert aus dem Weg zu fahren oder zu schieben.

Aus der Betrachtung der Szenarien lassen sich die zusätzlichen Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf in *Tabelle 6.4* formulieren.

Nr.	Anforderung
A01.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss stets in einem Zustand betrieben werden, in dem das Risiko für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer zumutbar ist.
A04.3	Wird das vollständig automatisierte Fahrzeug zum Anhalten gezwungen, soll es auf einem Seitenstreifen oder am Fahrbahnrand stehenbleiben und den Verkehr oder Rettungswege oder Rettungsgassen nicht blockieren.
A04.4	Wird das vollständig automatisierte Fahrzeug zum Anhalten gezwungen, darf es nur auf einem Fahrstreifen anhalten, falls alle folgenden Bedingungen zutreffen: <ul style="list-style-type: none"> – Die Relativgeschwindigkeit zu weiteren Verkehrsteilnehmern ist unterhalb eines noch zu definierenden Maximums⁷. – Das stehende Fahrzeug blockiert keine Rettungsfahrzeuge oder Rettungswege. – Ein Passagier oder ein Teleoperator kann das Fahrzeug in kurzer Zeit⁸ von diesem Standort entfernen. – Ein Passagier kann das Fahrzeug absichern oder das stehende Fahrzeug ist ausreichend gut erkennbar⁹.
A05.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine eigene aktuelle Leistungsfähigkeit kennen und bei Fahrentscheidungen berücksichtigen.
A05.7	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine eigenen aktuellen funktionalen Grenzen abhängig von der aktuellen Situation kennen und bei Fahrentscheidungen berücksichtigen.
A08.2	Bewegt sich das vollständig automatisierte Fahrzeug mit hohem Risiko oder ist es an einer gefährlichen Stelle stehen geblieben, muss es einen Notruf absetzen und Hilfe anfordern.

Tabelle 6.4: Anforderungen an das Verhalten des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf basierend auf den möglichen sicheren Zuständen

6.3.2 Bedeutung der Geschwindigkeit für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf

Die Geschwindigkeit eines vollständig automatisierten Fahrzeugs hat einen bedeutenden Einfluss auf das Risiko beim Betrieb, da eine höhere Geschwindigkeit in den meisten Fällen das Unfallrisiko und die Unfallfolgen erhöht. In diesem Kapitel soll daher exemplarisch ein Szenario aus *Kapitel 6.1.2* betrachtet werden. Das Ziel ist die Identifikation einer sicheren maximalen Geschwindigkeit abhängig von der Sensorsichtweite, den Straßenverhältnissen und der Reaktionszeit des Fahrzeugs. Die hier verwendeten Zahlenwerte basieren auf Ergebnissen aus dem Projekt Stadtpilot in städtischer Umgebung. Auf Fern- und Landstraßen sind die gefahrenen Geschwindigkeiten höher. Dadurch erhöhen sich die Vorhersehbarkeit des Verhaltens der weiteren Verkehrsteilnehmer in allen dort auftretenden Szenarien (*Kapitel 6.1.1*).

In einer städtischen Umgebung hängen die Wahrnehmung, Klassifikation und Verfolgung von nicht beweglichen und beweglichen Objekten von der Pose dieser relativ zum Fahrzeug ab. Basierend auf Erfahrungen im Braunschweiger Stadtverkehr sind 5,0 m, 15,0 m und 25,0 m als Sichtweiten zur Erkennung von plötzlich auftretenden Objekten sinnvolle Werte für exemplarische Berechnungen. Objekte, die unerwartet näher als 5,0 m vor dem Fahrzeug auftauchen, können nur schwer wahrgenommen werden. Objekte, die weiter als 25,0 m entfernt sind, werden in der Regel rechtzeitig wahrgenommen. 15,0 m als zusätzliche Entfernung zwischen den beiden erstgenannten Werten erscheint ebenfalls als sinnvoller Wert, da dies häufig dem Abstand zwischen zwei Fahrzeugen in der Stadt entspricht.

Die Reaktionszeit auf Objekte berechnet sich aus der Zeit bis zur Detektion eines Objekts durch den Sensor, der Dauer der Zuordnung des Objekts zum Fahrstreifen und der Berechnung und Umsetzung einer Reaktion auf dieses Objekt. Für die beispielhaften Szenarien wird der Aufbau des vollen Bremsdrucks angenommen, der bis zu 0,3 s dauern kann (Johansson und Rumar, 1971). Die Werte 1,1 s, 0,8 s und 0,5 s sind daher für die beispielhafte Berechnung geeignet, wobei 1,1 s für einen Menschen und 0,8 s für ein Fahrzeugführungssystem durchschnittlich sind. 0,5 s sind niedrig angesetzt, aber dennoch basierend auf den Erfahrungen aus dem Projekt Stadtpilot erreichbar.

Ein Reibungskoeffizient zwischen Reifen und Fahrbahn von 1,0 ist theoretisch möglich, wird in der Realität jedoch nur selten erreicht. Ein Wert von 0,6 als durchschnittlicher Wert für eine trockene Straße ist sinnvoll, ebenso wie ein minimaler Wert von 0,2 für eine verschneite, glatte Straße (Muller u. a., 2003).

Das Szenario, für das eine sichere Geschwindigkeit ermittelt werden soll, ist in *Abbildung 6.9* dargestellt. In diesem Szenario ist nur eine Vollbremsung zur Verhinderung der Kollision mit dem plötzlich auf die Fahrbahn tretenden Fußgänger möglich, da ein Ausweichen aufgrund des entgegenkommenden Verkehrs nicht möglich ist. d_d ist der Abstand zwischen dem vollständig automatisierten Fahrzeug (blau) und dem Fußgänger zu dem Zeitpunkt, an dem die Sensorik den Fußgänger das erste Mal wahrnimmt. Das Fahrzeug reagiert mit einer Vollbremsung. s_s ist der Anhalteweg des Fahrzeugs, bestehend aus dem Reaktionsweg s_r und dem Bremsweg s_b .

Mit einer optimistischen Annahme des Reibungskoeffizienten $\mu = 1,0$ zwischen Reifen und Fahrbahn, einer Reaktionszeit von $t_r = 0,5 \text{ s}$, einer Sensorsichtweite von $d_d = 25,0 \text{ m}$ und der Gravitationskonstante $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$ resultiert aus der folgenden Berechnung die sichere

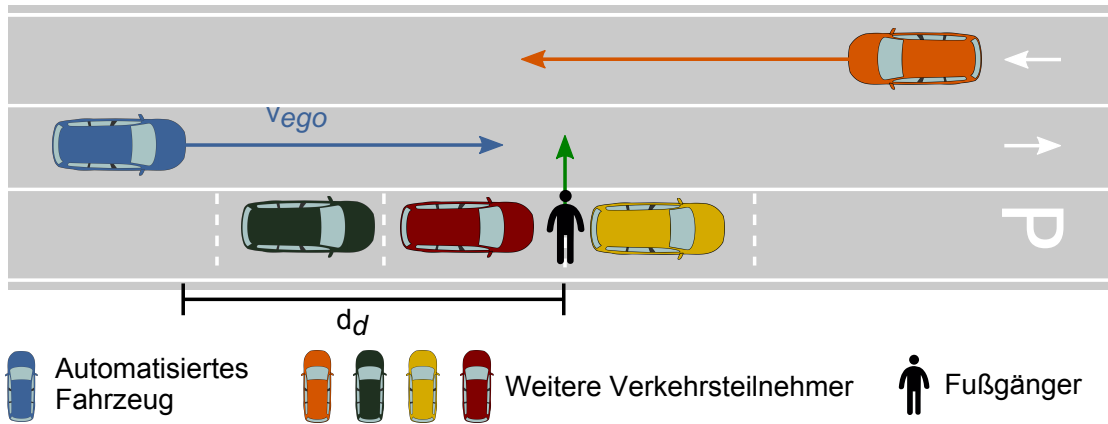


Abbildung 6.9: Szene zur Berechnung einer sicheren Geschwindigkeit

maximale Geschwindigkeit v_{ego} , aus der das Fahrzeug vor einer Kollision zum Stillstand kommt.

Zu lösende Gleichung:

$$s_s \leq d_d$$

Anhalteweg:

$$s_s = s_r + s_b = v_{ego} t_r + \frac{v_{ego}^2}{2\mu g}$$

Berechnung der sicheren maximalen Geschwindigkeit v_{ego} :

$$v_{ego} \approx \frac{-t_r \pm \sqrt{(t_r)^2 - 4 \cdot \frac{1}{2\mu g} - d_d}}{2 \cdot \frac{1}{2\mu g}}$$

$$v_{ego} \approx \frac{-0,5 \text{ s} \pm \sqrt{(0,5 \text{ s})^2 - 4 \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,0 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - 25,0 \text{ m}}}{2 \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,0 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

$$\approx \underline{\underline{17,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

Als Ergebnis für diese beispielhafte Berechnung resultiert eine sichere maximale Geschwindigkeit von $\approx 17,8 \text{ m/s}$ ($\approx 65 \text{ km/h}$) bei sehr guten Bedingungen. Diese Geschwindigkeit kann für gute Bedingungen somit als obere Grenze angesehen werden. Darauf aufbauend zeigen die Graphen in *Abbildung 6.10* und die *Tabelle 6.5* verschiedene maximale sichere Geschwindigkeiten abhängig von den Straßenverhältnissen, dem Sichtbereich und der Reaktionszeit des Fahrzeugs. Die sichere maximale Geschwindigkeit sinkt stark, wenn einer der Parameter in den Bereich von schlechten Bedingungen fällt. Als Konsequenz daraus muss ein vollständig automatisiertes Fahrzeug deutlich langsamer fahren, um in den betrachteten Szenario sicher anhalten zu können. Bei einer Reaktionszeit von 0,8 s, einem Sichtbereich von 15 m und einem Reibungskoeffizienten von 0,6 liegt die sichere maximale Geschwindigkeit bei

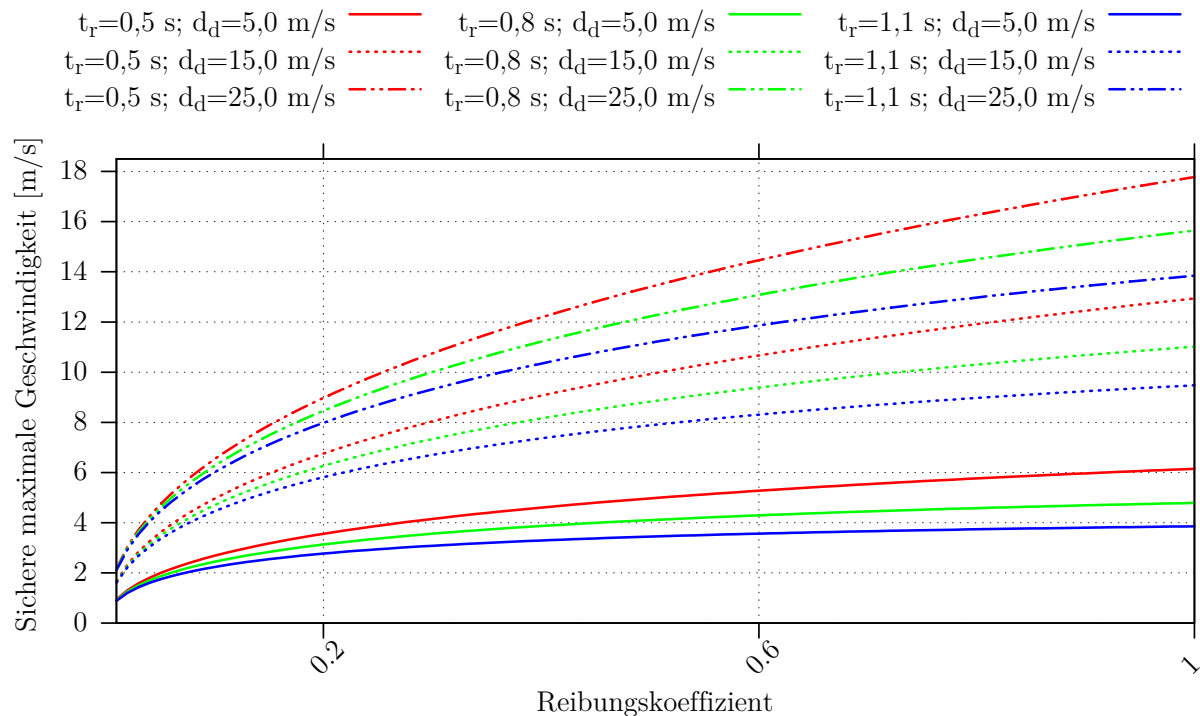


Abbildung 6.10: Graphen zu den sicheren maximalen Geschwindigkeiten für verschiedene Reaktionszeiten t_r und unterschiedliche Sichtweiten d_d in Abhängigkeit vom aktuellen Reibungskoeffizienten μ

$\approx 9,4 \text{ m/s}$ (34 km/h). Dies deckt sich mit den Erfahrungen im Projekt Stadtpilot, jedoch ergeben sich bei langsamer Fahrweise neue Schwierigkeiten beim Betrieb im Mischverkehr mit schneller fahrenden Fahrzeugen.

Auch wenn die Ergebnisse in *Abbildung 6.10* und in *Tabelle 6.5* nur theoretisch sind, wird dennoch deutlich, dass die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs ein erheblicher Faktor für den Betrieb ist. Langsames Fahren reduziert die Unfallgefahr besonders bei schlechten Bedingungen.

6.3.3 Zusammenfassung

Die identifizierten sicheren Zustände können erreicht werden, wenn eine Weiterfahrt des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf nicht mehr möglich ist. Für den Stadtverkehr ist der Stillstand eine mögliche Option, wenn das Fahrzeug für die weiteren Verkehrsteilnehmer entsprechend sichtbar ist und keine Rettungswege blockiert. Besser ist es, wenn ein Funktionsumfang erhalten wird, der ein Anhalten am Straßenrand oder ein Verlassen des Verkehrs ermöglicht.

Die Betrachtung der Geschwindigkeit zeigt deren Bedeutung für einen sicheren Betrieb. Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss mit angepasster Geschwindigkeit fahren, um Kollisionen vorzubeugen. Dadurch können Gefährdungen für die weiteren Verkehrsteilnehmer verhindert werden. In *Tabelle 6.6* sind alle Anforderungen aus den vorherigen und diesem Kapitel zusammengefasst. Diese bilden die Grundlage für die erforderlichen Fahrmanöver im folgenden Kapitel.

$t_r = 0,5 s$			$t_r = 0,8 s$			$t_r = 1,1 s$		
$d_d[m]$	μ	$v_{ego}[\frac{m}{s}]$	$d_d[m]$	μ	$v_{ego}[\frac{m}{s}]$	$d_d[m]$	μ	$v_{ego}[\frac{m}{s}]$
25,0	1,0	17,8	25,0	1,0	15,7	25,0	1,0	13,9
25,0	0,6	14,5	25,0	0,6	13,0	25,0	0,6	11,9
25,0	0,2	9,0	25,0	0,2	8,5	25,0	0,2	8,0
15,0	1,0	13,0	15,0	1,0	11,0	15,0	1,0	9,5
15,0	0,6	10,7	15,0	0,6	9,4	15,0	0,6	8,3
15,0	0,2	6,8	15,0	0,2	6,3	15,0	0,2	5,8
5,0	1,0	6,2	5,0	1,0	4,8	5,0	1,0	3,9
5,0	0,6	5,3	5,0	0,6	4,8	5,0	0,6	3,6
5,0	0,2	3,6	5,0	0,2	3,1	5,0	0,2	2,8

Tabelle 6.5: Sichere maximale Geschwindigkeiten v_{ego} in Abhängigkeit von Reaktionszeit t_r (Linke Spalte: $t_r = 0,5 s$, Mittlere Spalte: $t_r = 0,8 s$, Rechte Spalte: $t_r = 1,1 s$), Sichtweite d_d und Reibungskoeffizient μ

Nr.	Anforderung
A01	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss eine Fahrmission in seinem Einsatzgebiet ohne menschlichen Eingriff erledigen.
−A01.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur in seinem Einsatzgebiet betrieben werden können.
−A01.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die Insassen nicht gefährden.
− −A01.2.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss stets einen sicheren Halteplatz erreichen können, um Passagiere sicher aussteigen lassen zu können.
−A01.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf die weiteren Verkehrsteilnehmer nicht gefährden.
− −A01.3.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich für die weiteren Verkehrsteilnehmer vorhersehbar verhalten.
− −A01.3.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich moralisch korrekt verhalten.
− −A01.3.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss sich kooperativ verhalten.

–A01.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss stets in einem Zustand betrieben werden, in dem das Risiko für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer zumutbar ist.
A02	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Umfeld des Fahrzeugs wahrnehmen.
–A02.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss das Straßennetz wahrnehmen (straßenbauliche Infrastruktur).
–A02.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die verkehrstechnische Infrastruktur wahrnehmen.
– –A02.2.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Bereich einer Arbeitsstelle wahrnehmen.
–A02.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die informationstechnische Infrastruktur nutzen.
– –A02.3.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss mit einer Rettungsleitstelle kommunizieren können.
–A02.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Straßenverhältnisse wahrnehmen.
–A02.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Umweltbedingungen wahrnehmen.
–A02.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die weiteren Verkehrsteilnehmer wahrnehmen.
– –A02.6.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Einsatzfahrzeuge als solche wahrnehmen.
– –A02.6.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Tiere wahrnehmen, bei denen bei einer Kollision eine Gefährdung für die Insassen besteht.
– –A02.6.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Gesten von Radfahrern wahrnehmen.
– –A02.6.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss entgegenkommende Fahrzeuge wahrnehmen.
– –A02.6.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Gesten von Personen wahrnehmen.
–A02.7	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Bedeutung von Elementen einer Szene verstehen.
A03	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen planen.

–A03.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass es vor einem auf dem eigenen Fahrstreifen vorhandenen Hindernis kollisionsfrei anhalten kann.
–A03.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass entgegenkommende Fahrzeuge rechtzeitig wahrgenommen werden können.
–A03.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass unvermittelt auf die Fahrbahn tretende Personen rechtzeitig wahrgenommen werden können.
–A03.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Einsatzfahrzeugen den erforderlichen Raum zur Verfügung stellen.
–A03.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten planen.
–A03.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Sicherheitsabstände zu anderen Verkehrsteilnehmern einhalten.
–A03.7	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss bei einer unvermeidlichen Kollision deren Folgen minimieren.
–A03.8	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss mit den weiteren Verkehrsteilnehmern kooperieren.
–A03.9	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine Geschwindigkeit an die aktuelle Sichtweite, die aktuelle Reaktionszeit auf neu wahrgenommene Hindernisse und den Reibungskoeffizienten anpassen.
–A03.10	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seinen Abstand an die aktuelle Sichtweite, die aktuelle Reaktionszeit auf neu wahrgenommene Hindernisse und den Reibungskoeffizienten anpassen.
A04	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fahrentscheidungen ausführen.
–A04.1	Als letzte Aktion im Betrieb muss ein vollständig automatisiertes Fahrzeug in den Stillstand abbremsen.
–A04.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss auf engem Raum mit sehr geringen Abständen zu weiteren Verkehrsteilnehmern manövrieren.
–A04.3	Wird das vollständig automatisierte Fahrzeug zum Anhalten gezwungen, soll es auf einem Seitenstreifen oder am Fahrbahnrand stehenbleiben und den Verkehr oder Rettungswege oder Rettungsgassen nicht blockieren.

–A04.4	<p>Wird das vollständig automatisierte Fahrzeug zum Anhalten gezwungen, darf es nur auf einem Fahrstreifen anhalten, falls alle folgenden Bedingungen zutreffen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Die Relativgeschwindigkeit zu weiteren Verkehrsteilnehmern ist unterhalb eines noch zu definierenden Maximums. – Das stehende vollständig automatisierte Fahrzeug blockiert keine Rettungsfahrzeuge oder Rettungswege. – Ein Passagier oder ein Teleoperator kann das vollständig automatisierte Fahrzeug in kurzer Zeit von diesem Standort entfernen. – Ein Passagier kann das vollständig automatisierte Fahrzeug absichern oder das stehende Fahrzeug ist ausreichend gut erkennbar.
A05	Ein vollständig automatisiertes Fahrzeug muss sich selbst wahrnehmen und benötigt eine Selbstrepräsentation, um seine eigenen Systemgrenzen im Betrieb zu ermitteln.
–A05.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss den Fahrzeugzustand überwachen.
–A05.2	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seinen Sensorsichtbereich kennen.
–A05.3	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine Reaktionszeit auf wahrgenommene Hindernisse kennen.
–A05.4	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine aktuell erreichbare Verzögerung kennen.
–A05.5	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Kollisionen mit sich selbst wahrnehmen.
–A05.6	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine eigene aktuelle Leistungsfähigkeit kennen und bei Fahrentscheidungen berücksichtigen.
–A05.7	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss seine eigenen aktuellen funktionalen Grenzen abhängig von der aktuellen Situation kennen und bei Fahrentscheidungen berücksichtigen.
A06	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Ladung überwachen.
A07	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die Insassen unterstützen.
A08	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss internationale und nationale Gesetze, Verordnungen und Richtlinien umsetzen.

–A08.1	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss die deutsche Straßenverkehrsordnung befolgen.
–A08.2	Bewegt sich das vollständig automatisierte Fahrzeug mit hohem Risiko oder ist es an einer gefährlichen Stelle stehen geblieben, muss es einen Notruf absetzen und Hilfe anfordern.

Tabelle 6.6: Resultierende Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf aus den Rahmenbedingungen, dem Stand der Technik, der Analyse der Einsatzumgebung, den pathologischen Szenarien, dem Sollverhalten, den sicheren Zuständen und der Geschwindigkeit. Geänderte und im Vergleich zu *Tabelle 6.2* hinzugekommene Anforderungen sind grau hinterlegt. Untergeordnete Gliederungsebenen bedeuten eine Verfeinerung der übergeordneten Anforderungen.

6.4 Erforderliche Fahrmanöver

In den vorhergehenden Kapiteln wurden Anforderungen an das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf gestellt. Um die notwendigen Aktionen des automatisierten Fahrzeugs zu beschreiben, eignen sich Fahrmanöver. Diese lassen sich sowohl separat als auch in Kombination beschreiben und liefern eine Grundlage für die erforderlichen Fertigkeiten eines automatisierten Fahrzeugs. Daher werden in diesem Kapitel Fahrmanöver definiert, die für einen sicheren Betrieb des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf erforderlich sind. Hierfür wird der Stand der Forschung betrachtet und als Ausgangsbasis verwendet.

Tölle (1996, Kapitel 3.3) unterscheidet insgesamt neun Fahrmanöver, die seiner Ansicht nach ausreichen, um am Straßenverkehr teilzunehmen. Diese leitet er von 17 Fahrmanövern von Nagel und Enkelmann (1991) ab, in dem er komplexe Fahrmanöver, wie zum Beispiel das Fahrmanöver *12. vor einem Gegenstand anhalten* von Nagel und Enkelmann (1991) als Spezialfall des Fahrmanövers *10. Annähern an einen sich vor einem Fahrzeug befindenden Gegenstand* von Nagel und Enkelmann (1991) definiert. Statt wie Nagel und Enkelmann (1991) für nicht bewegliche und bewegliche Objekte jeweils ein Manöver zu definieren, reduziert Tölle (1996, Kapitel 3.3.1) die Menge auf ein Fahrmanöver mit einem Bezugsobjekt, das entweder ein realer Verkehrsteilnehmer oder ein virtuelles Objekt ist. Die Bezeichnung *virtuelles Objekt* ist irreführend, da damit beispielsweise Haltelinien an Kreuzungen gemeint sind, die durch eine Markierung kenntlich gemacht sein können und daher real existieren. Tölle (1996, Seite 32) verwendet den Begriff *virtuell* für Objekte, die keine Hindernisse sind. Für die technische Umsetzung, so Tölle (1996, Seite 32), ist es nicht relevant, ob es sich um reale Verkehrsteilnehmer oder die von ihm beschriebenen virtuellen Objekte handelt. Daher lässt sich die Menge der Fahrmanöver von Nagel und Enkelmann (1991) reduzieren.

Tölle (1996, Seite 33) definiert die folgenden neun Fahrmanöver in der Basismenge:

- „MR1 (Anfahren);
- MR2 (Folgen);
- MR3 (Annähern);
- MR4 (Passieren);
- MR5 (Kreuzung überqueren);
- MR6 (Fahrspurwechsel);
- MR7 (Abbiegen);

MR8 (Umkehren);
MR9 (Parken).“

(Tölle, 1996, Seite 33)

Für einen Fahrstreifenwechsel verwendet Tölle (1996) den umgangssprachlich geläufigen Begriff „Fahrspurwechsel“.

Aus diesen Fahrmanövern leiten sich komplexere Verhaltensweisen für Fahrzeuge ab. Beispielsweise kann ein Fahrzeug abbiegen (MR7 Abbiegen) und dabei einem weiteren Fahrzeug folgen (MR2 Folgen). In der vorliegenden Arbeit wird diese Menge bis auf *MR5 Kreuzung überqueren* übernommen. Dieses Fahrmanöver ist ein Spezialfall des Fahrmanövers *MR2 Folgen*, da beim Überqueren einer Kreuzung oder Einmündung einem Fahrstreifen¹⁰ gefolgt wird - unabhängig davon, ob dieser durch Fahrbahnmarkierungen sichtbar ist oder ob sich dieser durch den an die Kreuzung führenden Fahrstreifen und den von der Kreuzung wegführenden Fahrstreifen definiert. Das Annähern an eine Kreuzung und gegebenenfalls Anhalten an einer Haltelinie (MR3 Anhalten) erfolgen als eigenständige Fahrmanöver, ebenso das Anfahren nach einem Halt (MR1 Anfahren). Auch das Abbiegen (MR7 Abbiegen) in eine Straße oder das Umkehren (MR8 Umkehren) auf einer Kreuzung sind eigenständige Fahrmanöver. Das Überqueren ist somit ein Folgen eines (virtuellen) Fahrstreifens. Die resultierenden acht Fahrmanöver werden basierend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Kapitel um das Fahrmanöver *Sicheres Anhalten* ergänzt und im Folgenden beschrieben.

Die Fahrmanöver sind nicht auf bestimmte pathologische Szenarien oder häufig vorkommende, nicht kritische Szenarien limitiert. In jedem der Szenarien wird mindestens ein Fahrmanöver ausgeführt. Zum sicheren Durchfahren können auch mehrere Fahrmanöver sequentiell erfolgen. Kommt es zu technischen Problemen oder kritischen Situationen, so können Fahrmanöver abgebrochen werden und beispielsweise eine Variation des sicheren Anhaltens ausgeführt werden. Besonders in den pathologischen Szenarien, in denen das System nahe an den Systemgrenzen betrieben wird, kann dies der Fall sein.

Fahrmanöver 1 - Anfahren

Das Anfahren an Haltelinien von Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen, an Fußgängerüberwegen, in Fahrzeugkolonnen und weiteren Situationen, in denen das vollständig automatisierte Fahrzeug bis in den Stillstand abgebremst hat, erfolgt aus dem Stillstand. Das vollständig automatisierte Fahrzeug fährt an, sobald der geplante Weg frei ist und es die Verkehrsregeln erlauben. Die Stellen, an denen angehalten werden muss, können von der Umfeldwahrnehmung erfasst werden, in einer digitalen Karte eingetragen sein oder über Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation empfangen werden. In den meisten Situationen ist der Zeitpunkt einer sicheren Weiterfahrt und somit der Beginn des Fahrmanövers Anfahren durch die Straßenverkehrsordnung vorgegeben, beispielsweise beim Wechsel einer Lichtsignalanlage auf grün. Jedoch kann es erforderlich sein, dass das vollständig automatisierte Fahrzeug an einer Haltelinie stehen bleibt, falls es die gesamte

¹⁰Ein Fahrstreifen kann durch Fahrbahnmarkierungen, die Randbebauung oder weitere bewegliche und nicht bewegliche Elemente begrenzt sein, beispielsweise durch parkende Fahrzeuge. Auf schmalen Straßen ohne Fahrbahnmarkierungen sind Fahrstreifen nicht visuell begrenzt. In diesem Fall können Fahrstreifen für eine Fahrtrichtung oder auch für beide Fahrtrichtungen genutzt werden. Im Folgenden wird dieser Unterschied vernachlässigt und davon ausgegangen, dass auf Straßen gefahren wird, die entweder über visuell / baulich begrenzte Fahrstreifen oder für alle Fahrtrichtungen genutzte befahrbare Bereiche der Straße verfügen.

Kreuzung nicht überqueren kann. Dies gilt auch für Bahnübergänge, an denen ein Anhalten auf den Bahngleisen eine Gefährdung darstellt.

Fahrmanöver 2 - Folgen

Das vollständig automatisierte Fahrzeug kann sowohl nicht beweglichen Objekten, wie zum Beispiel der Begrenzung der Fahrbahn, folgen oder beweglichen Objekten, wie zum Beispiel einem weiteren Verkehrsteilnehmer. Meist wird beides kombiniert, damit ein vollständig automatisiertes Fahrzeug im Straßenverkehr seinem Fahrstreifen kollisionsfrei folgt.

Fahrstreifen und Fahrbahnverlauf Ein vollständig automatisiertes Fahrzeug folgt in den meisten Fällen dem Verlauf der Richtungsfahrbahn und im Speziellen dem Verlauf eines Fahrstreifens. Nur in Sonderfällen, wie zum Beispiel auf Freiflächen zum Parken, ist dies nicht der Fall. Fahrbahnverlauf und Fahrstreifenverlauf können in digitalen Karten abgelegt sein und / oder durch die Umfeldwahrnehmung erfasst werden. Zum Folgen dieser muss sich das Fahrzeug relativ zu diesen lokalisieren können (Matthaei, 2015, Kapitel 14).

Verkehrsteilnehmer Neben Fahrbahnverlauf und Fahrstreifen muss ein vollständig automatisiertes Fahrzeug die eigene Fahrgeschwindigkeit an die anderen Verkehrsteilnehmer anpassen. Dies geschieht in der Regel durch Folgen eines anderen Verkehrsteilnehmers auf dem eigenen Fahrstreifen. Auch das Fahren im Stau mit Stop-and-Go-Verkehr ist eine Folgefahrt. Hier wird jedoch zusätzlich angefahren und angenähert (siehe Fahrmanöver 1 - Anfahren und Fahrmanöver 3 - Annähern).

Fahrmanöver 3 - Annähern

Das Annähern geht den Fahrmanövern Folgen und Anfahren voraus. Nähert sich das vollständig automatisierte Fahrzeug einem weiteren fahrenden Verkehrsteilnehmer an, so wird bei entsprechendem Abstand das Fahrmanöver 2 - Folgen ausgeführt. Nähert sich das vollständig automatisierte Fahrzeug der Haltelinie einer Kreuzung, einem Fußgängerüberweg oder einem stehenden weiteren Verkehrsteilnehmer an und die Situation erfordert ein Abbremsen in den Stillstand, so folgt auf das Annähern das Anfahren. Das Annähern schließt das Bremsen in den Stillstand mit ein. Beim Annähern wird wie beim Anfahren und Folgen zwischen unbeweglichen und beweglichen Objekten unterschieden.

Ob das vollständig automatisierte Fahrzeug bei Hindernissen, Lichtsignalanlagen und Verkehrszeichen anhalten muss, kann durch deren Lage beziehungsweise Zustand erkannt werden.

Beispiel Fußgängerüberweg: Bei der Annäherung an einen Fußgängerüberweg muss das vollständig automatisierte Fahrzeug die Absicht von Fußgängern und häufig auch Fahrradfahrern wahrnehmen, damit es, falls notwendig, anhalten kann. Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss Fußgänger und Fahrradfahrer daher nicht nur wahrnehmen, sondern auch interpretieren, ob diese die Straße überqueren möchten oder nicht.

Fahrmanöver 4 - Passieren

Wenn der eigene Fahrstreifen verengt ist, kann ein Ausweichmanöver notwendig werden. Im Fall des Passierens ist eine Verengung nur so gering, dass ein Fahrstreifenwechsel nicht erforderlich ist. Zum sicheren Ausweichen muss das Fahrzeug den Raum neben und hinter sich selbst wahrnehmen, damit eine leichte laterale Korrektur nicht zu einer Kollision mit einem weiteren Verkehrsteilnehmer oder der Randbebauung führt. Da weitere Verkehrsteilnehmer auch im toten Winkel des Fahrzeugs sein können, ist eine Wahrnehmung des Bereichs

seitlich und hinter dem eigenen Fahrzeug notwendig. Neben der Position der weiteren Verkehrsteilnehmer ist auch die Erfassung der relativen Geschwindigkeit zu diesen notwendig, um Kollisionen zu vermeiden. Eine Besonderheit ist das Passieren von geparkten Fahrzeugen am Fahrbahnrand. Wie in *Abbildung 6.7* dargestellt, können Fußgänger und Radfahrer unvermittelt auf die Fahrbahn treten beziehungsweise fahren.

Häufig ist es zusätzlich erforderlich, dass Verkehrsteilnehmer miteinander kooperieren, um ihre jeweiligen Ziele zu erreichen. Gegenseitige Rücksichtnahme beim Ausweichen kann ein solcher Fall sein.

Fahrmanöver 5 - Fahrstreifenwechsel

Ist ein Ausweichen innerhalb des eigenen Fahrstreifens nicht möglich oder ist zur Erfüllung der Fahrmission ein Fahrstreifenwechsel erforderlich, so muss das vollständig automatisierte Fahrzeug selbständig auf einen anderen Fahrstreifen wechseln. Für einen Fahrstreifenwechsel ist es zusätzlich erforderlich, den Bereich seitlich und hinter dem vollständig automatisierten Fahrzeug wahrzunehmen, da von hinten kommende Verkehrsteilnehmer beachtet werden müssen. Für diesen Fall ist eine 360°-Rundumsicht notwendig. Die Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern beim Fahrstreifenwechsel ist in innerstädtischen Situationen ein wichtiger Faktor für den Erfolg des Manövers (Ulbrich, 2016, Kapitel 4). Auch auf Autobahnen beim Reißverschlussverfahren oder beim Wechsel von einer parallelen Parkbucht auf einen Fahrstreifen in der Stadt ist häufig eine Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern erforderlich. Die Ermöglichung der Interaktion zwischen vollständig automatisierten und manuell gefahrenen Fahrzeugen muss berücksichtigt werden.

Anmerkung: Die bisher vorgestellten Manöver beschränken sich auf das Folgen einer Route auf einer Straße ohne Abbiegemanöver. Dennoch sind bereits für diese Manöver umfangreiche Anforderungen zu erfüllen, um einen sicheren Betrieb zu ermöglichen. Eine 360°-Umfeldwahrnehmung muss bewegliche Objekte und Fahrbahnmarkierungen, Randbebauung, Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen wahrnehmen. Die fehlerfreie Kommunikation mit der Verkehrsinfrastruktur und digitale Karten mit hoher Qualität können unterstützend wirken.

Fahrmanöver 6 - Abbiegen

Bei Abbiegemanövern sind neben Vorfahrtregeln auch Fußgänger- und Fahrradwege zu beachten. Sowohl beim Rechtsabbiegen als auch beim Linksabbiegen können Querverkehr, entgegenkommender Verkehr und schwer einsehbare Seitenstraßen zu einer hohen Anzahl zu beachtender Objekte führen. Auch das Einfahren in einen Kreisverkehr und das Ausfahren aus einem Kreisverkehr sind in diesem Sinne Abbiegemanöver. Für ein vollständig automatisiertes Fahrzeug sind solche Situationen herausfordernd. Es ist notwendig, dass alle anderen Verkehrsteilnehmer wahrgenommen werden und ihre Intention richtig interpretiert wird. Auch beim Abbiegen kann je nach Situation die Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern erforderlich werden. Beispielsweise kann der Verzicht auf das Vorfahrtrecht bei einmündenden Straßen zu einem insgesamt erhöhten Verkehrsfluss führen.

Beispiel für eine Kreuzungssituation: Ein Beispiel für eine Kreuzungssituation ist die Kreuzung der Straßen Cyriaksring, Luisenstraße und Münchenstraße in Braunschweig, dargestellt in *Abbildung 6.11*.

Besonders herausfordernd ist hier das Linksabbiegen aus nördlicher Richtung vom Cyriaksring in die Luisenstraße, wie in *Abbildung 6.11* eingezeichnet. Obwohl ein Fahrstreifen für das

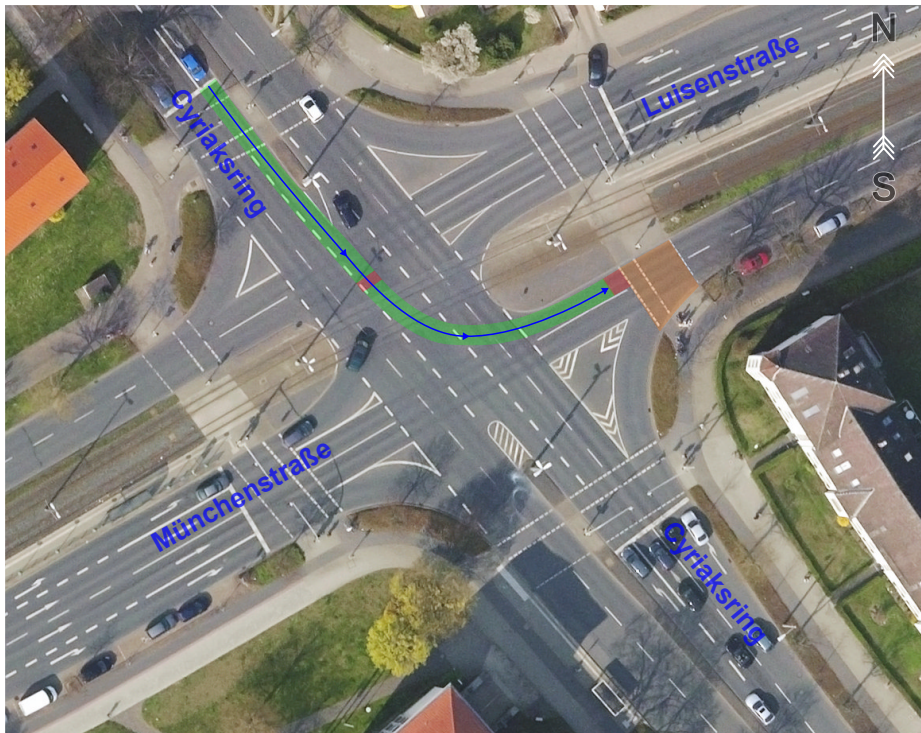


Abbildung 6.11: Kreuzung Cyriaksring, Luisenstraße und Münchenstraßen in Braunschweig; Luftbild
© 2014 Stadt Braunschweig

Linksabbiegen vorhanden ist, sind entgegenkommende Fahrzeuge aus südlicher Richtung bevorrechtigt. Diese fahren teils mit mehr als 60 km/h auf die Kreuzung zu. Rettungsfahrzeuge können noch schneller unterwegs sein. Aufgrund der Bahngleise auf der Kreuzung ist der Weg über die Kreuzung ungewöhnlich lang, sodass eine entsprechend hohe Zeitlücke zwischen entgegenkommendem Fahrzeug und vollständig automatisiertem Fahrzeug erforderlich ist, damit das vollständig automatisierte Fahrzeuge die Kreuzung gefahrlos überqueren und abbiegen kann. Weiterhin werden die möglichen Zielfahrstreifen der Luisenstraße durch einen Fußgängerüberweg und einen Fahrradweg gekreuzt. Hier kann sich ein Rückstau bilden, der ein Einfahren in die Luisenstraße erschwert oder verhindert. Auf den Mittelstreifen der Luisenstraße und der Münchenstraße befinden sich jeweils Haltestellen für die Straßenbahn. Es ist daher mit einer erhöhten Anzahl an Fußgängern zu rechnen.

Besonders das Linksabbiegen mit Gegenverkehr vom Cyriaksring in die Luisenstraße zeigt die große Herausforderung von Abbiegemanövern in städtischer Umgebung. Die Umfeldwahrnehmung eines vollständig automatisierten Fahrzeugs muss für die sichere Ausführung des Manövers den Raum vor sich selbst in Richtung des Cyriaksring wahrnehmen, sowie den Bereich links des Fahrzeugs in der Luisenstraße. Basierend auf diesen Informationen muss eine Fahrentscheidung getroffen und ausgeführt werden. In diesem Fall sind der richtige Zeitpunkt des Beginns des Abbiegens und eine angepasste Geschwindigkeit, die ein Kompromiss aus zügigem Verlassen des Cyriaksrings und langsamem Annähern an den Fußgängerüberweg in der Luisenstraße sein kann, zu wählen.

Fahrmanöver 7 - Umkehren

Das Umkehren unterscheidet sich vom Abbiegen, das in der Regel in einem Zug erfolgt, da es sich hierbei um ein Wendemanöver mit mehreren Fahrtrichtungswechseln des umkehrenden vollständig automatisierten Fahrzeugs handeln kann.

Fahrmanöver 8 - Parken

Das Parken schließt das Ein- und das Ausparken ein. Beides kann sowohl parallel zur Fahrtrichtung des Fahrstreifens von dem aus eingeparkt wird als auch in einem Winkel bis zu einem senkrechten Winkel zu diesem erfolgen. Auf Parkplätzen und besonders auf Freiflächen können sich zahlreiche unterschiedliche Verkehrsteilnehmer, zum Beispiel Personen mit Einkaufswagen, Fahrradfahrer, Fahrzeuge etc., befinden. Diese müssen beachtet werden und sind häufig bevorrechtigt. Das Fahrmanöver Parken umfasst alle Bewegungen des Fahrzeugs, die zum Einparken oder Ausparken notwendig sind. Bei parallelen Parklücken erfolgt vor dem Einparken das Annähern an einen virtuellen Haltepunkt und nach dem Ausparken das Anfahren und gegebenenfalls ein Fahrstreifenwechsel in den fließenden Verkehr.

Fahrmanöver 9 - Sicheres Anhalten

Das Sichere Anhalten¹¹ ist ein Fahrmanöver, mit dem das vollständig automatisierte Fahrzeug kontrolliert anhalten soll, falls alle anderen Reaktionen auf ein unerwartetes Ereignis oder einen Systemfehler nicht möglich oder sinnvoll sind. Aufgrund der aufgestellten Anforderungen und der Analyse der Szenarien ist der Stillstand in vielen Situationen eine Möglichkeit, einen sicheren Zustand zu erhalten. Entscheidend dafür ist der endgültige Halteort des Fahrzeugs. Soll das vollständig automatisierte Fahrzeug beispielsweise für den Transport eingeschränkt mobiler Menschen eingesetzt werden, so sind diese nach einem Anhalten möglicherweise nicht in der Lage selbständig auszusteigen und an den Fahrbahnrand zu gelangen. Ein Passagier, der über eine Fahrerlaubnis verfügt, könnte die automatisierte Fahrzeugführung nach dem Erreichen des Stillstands beenden und manuell weiterfahren, sofern der vorliegende Fehler im System ein manuelles Fahren zulässt und die erforderlichen Bedienelemente vorhanden sind. Auch ein Teleoperator könnte das Fahrzeug je nach zur Verfügung stehender Leistungsfähigkeit von seinem Halteort wegfahren.

Der Stillstand kann auf mehrere Arten erreicht werden, abhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs und von der Situation:

1. Durch einen Nothalt durch Aufbau von Bremsdruck an Ort und Stelle ohne Berücksichtigung der Querführung (Vollbremsung)¹²
2. Durch das Abfahren der letzten berechneten Bahn mit gleichzeitiger Verzögerung, um das Risiko von Kollisionen zu reduzieren
3. Durch das Anhalten an einer geeigneten Stelle, zum Beispiel durch Verlassen des fließenden Verkehrs oder Anhalten am Fahrbahnrand

¹¹Die Idee für das Sichere Anhalten entstand im Projekt aFAS (Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen) gemeinsam mit Gerrit Bagschik und Torben Stolte (Stolte u. a., 2015). Der Autor der vorliegenden Arbeit hat den Betriebszustand Sicheres Anhalten aus aFAS in ein Fahrmanöver überführt und auf das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf angewendet.

¹²Dies entspricht der Aktion im Betriebszustand Sicheres Anhalten im Projekt aFAS.

Diese drei Ausprägungen des Sicheren Anhaltens werden im Folgenden beschrieben.¹³

Nothalt Bei einem Nothalt verzögert das vollständig automatisierte Fahrzeug so lange, bis es den Stillstand erreicht. Die Verzögerung des vollständig automatisierten Fahrzeugs muss relativ stark ausfallen, um schnell stehen zu bleiben und unkontrollierte Manöver des Fahrzeugs zu verhindern. Allerdings sollte keine Vollbremsung erfolgen, weil das vollständig automatisierte Fahrzeug von anderen Verkehrsteilnehmern übersehen werden könnte oder diese nicht mehr rechtzeitig hinter dem Fahrzeug anhalten und es zu einer Kollision kommen könnte - unabhängig davon, ob es sich um ordnungswidriges Verhalten handelt oder nicht. Hier kann die Norm ISO 22839 zur Hilfe genommen werden. In dieser wird die maximale Verzögerung für ein System zur Reduzierung der Folgen eines Auffahrunfalls mit 6 m/s angegeben (ISO 22839, 2013). Dieser Wert eignet sich als Maximalwert für den Nothalt an Ort und Stelle. Falls eine geregelte Bremsung nicht möglich ist, ist eine maximale Verzögerung dennoch sinnvoll. Für die berechneten Werte in *Tabelle 6.5* bedeutet dies, dass nur die Werte äquivalent zu $\mu = 0,6$ erreicht werden können. Eine höhere Verzögerung wäre dann nicht erlaubt, da die Gefahr von Auffahrunfällen zu hoch ist.

Die technische Realisierung eines Nothalts ist vergleichsweise einfach. Es reicht aus, wenn das Bremssystem und bei Elektrofahrzeugen zusätzlich das Antriebssystem in der Lage sind, das vollständig automatisierte Fahrzeug mit der oben genannten Verzögerung oder einer maximalen Verzögerung zum Stillstand zu bringen. Die funktionalen Komponenten des Fahrzeugführungssystems, wie zum Beispiel die Umfeldwahrnehmung, die Lokalisierung oder die Entscheidungsfindung, müssen nicht verfügbar sein. Der Lenkwinkel bei einem Nothalt kann so beibehalten werden, wie er als letztes vom Fahrzeugführungssystem angefordert wurde.

Abfahren der letzten geplanten Bahn Ist das vollständig automatisierte Fahrzeug noch in der Lage, die letzte aus einer Fahrentscheidung resultierende Bahn abzufahren, so kann das Risiko einer Kollision reduziert werden. Durch die Einhaltung der letzten geplanten Bahn durch die weitere Nutzung der Querverführung und bei gleichzeitiger Verzögerung in den Stillstand kann das vollständig automatisierte Fahrzeug den Stillstand sicherer erreichen, als dies mit einem Nothalt möglich ist.

Die Situation für die Passagiere kann ähnlich wie beim Nothalt sein. Die technische Realisierung des Anhaltens ist hier aufwendiger, da die letzte geplante Bahn zur Verfügung stehen muss, die Eigenbewegung des Fahrzeugs relativ zu dieser Bahn ermittelt werden muss und der Lenkwinkel und die Verzögerung geregelt werden müssen.

Anhalten an geeigneter Stelle Wenn das vollständig automatisierte Fahrzeug in der Lage ist einen Fahrstreifenwechsel auszuführen, so dass es auf dem Seitenstreifen oder zumindest auf dem rechten Fahrstreifen der Fahrbahn anhalten kann, ist dies dem Nothalt und dem Abfahren der letzten geplanten Bahn vorzuziehen. Ein Anhalten am Fahrbahnrand weist ein geringeres Risiko auf. Auch sollte ein Abbiegemanöver oder ein Fahrstreifenwechsel beendet werden, bevor das vollständig automatisierte Fahrzeug anhält. Beim Einsatz auf Landstraßen oder Autobahnen ist ein Nothalt auf Beschleunigungs- und Verzögerungsstreifen

¹³Bei allen Ausprägungen werden die moralischen Aspekte der Ausführung der Manöver in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Dies muss jedoch vor einer Einführung in den öffentlichen Straßenverkehr erfolgen. Die bereits erwähnten Arbeiten von Ulbrich (2016), Gerdes und Thornton (2015) und Lin (2015), sowie Maurer u. a. (2015) behandeln dieses Thema.

oder auf einstreifigen Straßenabschnitten zu vermeiden, da dies unzulässig ist und zu einer Behinderung des Verkehrs führt.

Aus technischer Sicht ist das Anhalten an geeigneter Stelle aufwendiger als an Ort und Stelle. Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss dafür in der Lage sein, den eigenen Fahrstreifen und die Geometrie der Straße zu kennen und die Hindernisse auf dem Weg zum Fahrbahnrand wahrzunehmen.

Die drei Arten des Sicheren Anhaltens sind zwar als Notfalllösungen erforderlich, sollten aber als letzte Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Bevor das vollständig automatisierte Fahrzeug stehen bleibt, sollte versucht werden, einen sicheren Zustand durch andere Aktionen zu erhalten. Dies kann durch das Prinzip der funktionalen Degradation geschehen und wird in *Teil III* der vorliegenden Arbeit diskutiert.

6.5 Fertigkeitengraph zur Modellierung des Fahrzeugführungssystems des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf¹⁴

Aus dem Anforderungskatalog in *Tabelle 6.6* und den erforderlichen Fahrmanövern beim Betrieb des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf werden in diesem Kapitel die notwendigen Fertigkeiten an das Fahrzeugführungssystem abgeleitet. Nach einer kurzen Einführung in die Begrifflichkeiten und einer Zusammenfassung der Arbeiten von Maurer (2000), Pellkofer (2003), Siedersberger (2003) und Bergmiller (2014) folgt eine Beschreibung des Fertigkeitengraphen als Werkzeug im Entwicklungsprozess für automatisierte Fahrzeuge. Wie Fertigkeitengraphen in Fähigkeitengraphen zur Online-Überwachung eines Fahrzeugführungssystems und des Fahrzeugs eingesetzt werden, folgt in *Kapitel 10.5*.

Während der Entwicklung des Fahrzeugführungssystems im Projekt Stadtpilot wurde deutlich, dass eine permanente Überwachung der Leistungsfähigkeit des Systems erforderlich ist (Reschka u. a., 2012). Eine vom Autor durchgeführte Literaturrecherche hat die im Folgenden vorgestellten Arbeiten als Grundlage ergeben. Eine Herausforderung stellte die Identifikation der im Betrieb erforderlichen Fähigkeiten dar. Hieraus entstand die Idee, diese bereits in der Konzeptphase unabhängig von der Implementierung des Systems zu identifizieren. Als Resultat wird das neue Konzept des Fertigkeitengraphen zur Modellierung der Fertigkeiten eines Fahrzeugführungssystems in der Konzeptphase im Folgenden vorgestellt. Bisherige Arbeiten haben den Fertigkeitengraph nicht in die Konzeptphase integriert, sondern nur die Überwachung des Systems zur Laufzeit mittels Fähigkeitengraphen betrachtet. Eine Evaluation ist in der vorliegenden Arbeit nicht enthalten, da die Fertigkeiten im Rahmen des Projekts Stadtpilot nicht implementiert wurden. Der Funktionsumfang des Versuchsträgers hat dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht ermöglicht.

Die Modellierung eines Fertigkeitengraphen wird zu den Entwicklungsprodukten der Item-Definition nach Norm ISO 26262 hinzugefügt. Das Vorgehen zur Erstellung des Fertigkeitengraphen für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf eignet sich, um einen einzigen vollständigen Fertigkeitengraph zu erstellen und dann alle zukünftigen Systemausprägungen von automatisierten Fahrzeugen daraus abzuleiten. Ein System, das alle Fertigkeiten in diesem Fertigkeitengraph umsetzt, kann mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden und unterschiedlichen Funktionsumfängen eingesetzt werden. Wie die einzelnen Fertigkeiten

¹⁴Teile dieses Kapitels wurden bereits in Reschka u. a. (2015) veröffentlicht.

umgesetzt sind und welche Charakteristika das resultierende vollständig automatisierte Fahrzeug hat, ist abhängig von der konkreten Implementierung.

6.5.1 Vorarbeiten

Die Notwendigkeit der Bewertung der eigenen Leistungsfähigkeit von elektronischen Fahrzeugsystemen wurde von Maurer (2000, Kapitel 1.1.2) formuliert. Nach seiner Auffassung hängt der verfügbare Grad der Automatisierung (GdA) unter Anderem von der aktuellen Leistungsfähigkeit des Systems ab.

„Wichtige Kriterien für die Bestimmung des GdA sind der Nutzerwunsch, die Anpassung an die aktuelle Leistungsfähigkeit und an die aktuelle Domäne“

(Maurer, 2000, Seite 4)

Maurer (2000, Kapitel 3.2.1) greift die Theorie der hierarchischen Mehrebenensysteme nach Mesarović u. a. (1970) auf. Darin wird die Interaktion zwischen verschiedenen Hierarchieebenen in Systemen beschrieben (Maurer (2000, Abbildung 3.2) nach Mesarović u. a. (1970, Fig. 2.1)). Diesem Konzept folgt der Fertigkeitengraph im Rahmen der Modellierung des Systems in der Konzeptphase. Fertigkeiten können als Subsysteme verstanden werden und lassen sich dadurch als Mehrebenensystem hierarchisch strukturieren. Fertigkeiten auf übergeordneten Ebenen sind von Fertigkeiten untergeordneter Ebenen abhängig.

Bei der Nutzung als Fähigkeitengraphen in den späteren Phasen des Entwicklungsprozesses (*Kapitel 10.5*) wird die von Mesarović u. a. (1970, Seite 36) beschriebene Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit (Übersetzt aus dem Englischen: *Performance Interdependence*) hinzugefügt (Maurer, 2000, Kapitel 3.2.1). Ein wesentlicher Gedanke ist die Notwendigkeit einer dauerhaften Überwachung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.

Siedersberger (2003) und Pellkofer (2003) haben das Konzept weiterentwickelt und einen Fokus auf die Auswahl von Fahrentscheidungen basierend auf bei ihnen genannten *Fähigkeitsnetzwerken* gelegt. Ulbrich (2016, Kapitel 10) nutzt das Konzept ebenfalls und verwendet Fähigkeiten als zusätzliche Informationen für die Entscheidung, ob Fahrstreifenwechsel sicher ausgeführt werden können oder nicht.

Zusätzlich zu den Fertigkeiten werden Sensoren, weitere Datenquellen, Aktoren und weitere Datensinken in den Fertigkeitengraphen als unterste Ebene modelliert. Die Sensoren teilen sich in Umfeldsensoren, die das Umfeld des Fahrzeugs wahrnehmen, und Fahrzeugsensoren, die interne Zustände und Eigenschaften des Fahrzeugs erfassen. Weitere Datenquellen sind beispielsweise die Mensch-Maschine-Schnittstelle, die gleichzeitig eine Datensenke ist, im Fahrzeug gespeicherte Daten, wie zum Beispiel eine digitale Karte, die ebenfalls mit neuen Informationen angereichert oder verändert werden kann, und Daten, die über Kommunikationskanäle empfangen werden. Aktoren sind bei Fahrzeugen zum Beispiel der Antriebsstrang, das Bremssystem und das Lenksystem. Weitere Datensinken sind beispielsweise Kommunikationskanäle, auf denen Daten gesendet werden.

Ein Fertigkeitengraph ist eine Detaillierung des Gesamtsystems mit übergeordneten Fertigkeiten und Fertigkeiten, die Fahrmanöver ermöglichen. Die Fertigkeiten werden von Experten in einem verteilten Expertensystem angeboten (Siedersberger, 2003, Kapitel 6.1, hier Fähigkeiten genannt). Experten sind in diesem Kontext Hardware- und Softwarekomponenten, die Funktionen anbieten und dem System dadurch Fertigkeiten zur Verfügung stellen. Je nachdem welche Fertigkeiten zur Verfügung stehen und mit welcher Güte diese ausgeführt werden können, werden Fahrentscheidungen geplant und ausgeführt.

Aufgrund der Abstraktion des Systems in der Darstellung als Fertigkeitengraph, kann dieser bereits in der Item-Definition des ISO 26262 Entwicklungsprozesses entwickelt werden. Die Funktion des Systems wird anhand des gewünschten Verhaltens des Fahrzeugs in Form von Fahrmanövern je nach Situation beschrieben. Das interne Systemverhalten wird an dieser Stelle noch nicht festgelegt, sondern erst durch die nachfolgende Entwicklung der funktionalen Systemarchitektur innerhalb der funktionalen Komponenten.

Der Fertigkeitengraph und die anschließend entwickelte funktionale Systemarchitektur liefern eine durch die Fertigkeiten des Menschen inspirierte und in funktionale Komponenten überführte Modellierung des Systems. Der Fertigkeitengraph liefert dabei einen Überblick über Abhängigkeiten innerhalb der notwendigen Fertigkeiten des Systems, sowie Datenquellen und Datensinken im Informationsverarbeitungsprozess. Die anschließend entwickelte funktionale Systemarchitektur enthält die erforderlichen funktionalen Komponenten (*Kapitel 6.6*).

Während des nachfolgenden Entwicklungsprozesses und weiterer Iterationen im Entwicklungsprozess sind Anpassungen an den Fertigkeiten möglich, da auch das Wissen über das Gesamtsystem und dessen Implementierung anwächst. Da die Fertigkeiten und der Fertigkeitengraph nicht in ihrer Größe und Struktur limitiert sind, sind Änderungen jederzeit möglich.

Eine wichtige Eigenschaft des Fertigkeitenkonzepts ist die Möglichkeit, den Fertigkeitengraph in einen Fähigkeitsgraph zu überführen, der für die Selbstrepräsentation während des Betriebs des Systems genutzt werden kann (*Kapitel 10.5*).

Für Bergmiller (2014) sind Fähigkeitsgraphen¹⁵ ein Teil des Selbstkonzepts, welches die Überwachung eines Systems und die Fehlererkennung in Full-by-wire-Fahrzeugen ermöglicht. Im Selbstkonzept wird die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugs basierend auf der Leistungsfähigkeit jeder Fähigkeit ermittelt. Dies ermöglicht eine Selbstrepräsentation der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs. Hierfür wird ein Fahrzeugmodell mit einem Leistungsmodell kombiniert, um den physikalischen Zustand des Fahrzeugs und die Handlungsmöglichkeiten abzubilden. Bergmiller (2014, Kapitel 8.2.2) zeigt in seiner Arbeit einen Ausblick, wie dieses Selbstkonzept auch zur Fahrzeugautomatisierung genutzt werden kann. Sein Fokus liegt jedoch auf der by-wire-Ansteuerung von Fahrzeugen und er geht nicht explizit auf die Umfeldwahrnehmung und die Entscheidungsfindung ein. Es ist jedoch möglich, das Selbstkonzept auf diese funktionalen Systemteile anzuwenden (*Kapitel 10.5*). Bei Fahrzeugführungssystemen muss ein Aspekt besonders berücksichtigt werden. Ein automatisiertes Fahrzeug wird mit einer nicht vollständig zu definierenden Menge an Situationen konfrontiert. Hieraus resultieren unvollständige Anforderungen an das Fahrzeugführungssystem und die Identifikation geeigneter Metriken zur Überwachung wird erschwert.

Zusätzlich muss das Fahrzeugführungssystem mit Unsicherheiten bei der Wahrnehmung des Umfelds umgehen können. Das Projekt Stadtpilot (Reschka u. a., 2012), das Projekt aFAS (Stolte u. a., 2015) und die weitere Entwicklung des Versuchsträgers MOBILE, unter anderem vorgestellt in Reschka u. a. (2014), erforschen diese Thematik. Auch Ulbrich (2016) widmet sich dem Umgang mit Unsicherheiten im Rahmen der Entscheidungsfindung für Fahrstreifenwechsel basierend auf unvollständigen und unsicheren Informationen.

Knoll und Christaller (2000) und Knoll (2003) nutzen den Begriff Selbstrepräsentation zur Beschreibung des inneren Zustands eines Roboters (Systemzustand) und der externen

¹⁵Bergmiller (2014) nennt diese im Englischen *skill graphs*, im Deutschen *Fertigkeitengraphen* (*Kapitel 2.3.2*)

Bedingungen, also der Situation in der sich ein Roboter befindet. Der Systemzustand wird durch die Selbstwahrnehmung erstellt. Die Selbstrepräsentation wird zur Berechnung und Auswahl von Aktionen verwendet. Dieses Begriffsverständnis wird in der vorliegenden Arbeit übernommen:

Definition

Die Selbstrepräsentation ist ein Abbild der Leistungsfähigkeit des Systems in der aktuellen Situation. Sie kombiniert den internen Systemzustand mit der aktuellen Situation.

Knoll und Christaller (2000) und Knoll (2003) beschreiben einen Ansatz für die Überwachung der Ausführung von Aktionen. Ein ähnlicher Ansatz wird auch von Siedersberger (2003) beschrieben. Die Überwachung der Ausführung von Aktionen unterscheidet sich hierbei von der Selbstüberwachung. Beim Betrieb eines mobilen Systems, wie eines Roboters oder eines automatisierten Fahrzeugs, werden Manöver geplant und ausgeführt. Die Überwachung der Ausführung von Aktionen vergleicht hierbei Sollgrößen mit Istgrößen, beispielsweise eine gewünschte Pose zu einem bestimmten Zeitpunkt mit der echten, erreichten Pose. Die Differenz zwischen Soll- und Istpose wird in der Selbstrepräsentation genutzt. Der Nachteil dieses Vorgehens ist dessen retrospektiver Charakter. Ein Manöver kann erst bewertet werden, wenn es bereits teilweise oder vollständig ausgeführt wurde. Daraus würde eine Planung und Ausführung von Manövern folgen, obwohl diese möglicherweise nicht sicher ausgeführt werden können. Für einen sicheren Betrieb ist jedoch das Verhindern der Planung und Ausführung von unsicheren Manövern erforderlich.

Thuy u. a. (2008) beschreiben ein Sicherheitssystem für den Versuchsträger *MUCCI* der Universität der Bundeswehr in München. Dieser nutzt das Fähigkeitsnetzwerk von Pellkofer (2003) und Siedersberger (2003) zur Leistungsbewertung des Fahrzeugführungssystems. Das Sicherheitskonzept ist auf die Überwachung der Ausführung von Aktionen ausgelegt und nutzt die ermittelten Informationen zu einer Online-Leistungsbewertung. Das Ergebnis daraus wird für die Auswahl von Fahrentscheidungen genutzt.

6.5.2 Struktur des Fertigkeitengraphen

In *Abbildung 6.12* ist die konzeptionelle Struktur des Fertigkeitengraphen dargestellt. Der Hauptknoten repräsentiert den Einstiegspunkt in das System. Die Fertigkeitsknoten sind hierarchisch strukturiert, sodass die Fertigkeitsknoten auf den höheren Ebenen zahlreiche direkte und indirekte Abhängigkeiten zu untergeordneten Fertigkeitsknoten haben können. Die unterste Ebene bilden die Sensoren und die weiteren Datenquellen (in grün dargestellt) und die Aktoren und weiteren Datensinken (in orange dargestellt). Darüber sind jeweils eine Wahrnehmungsfertigkeit (hellgrün) und eine Aktionsfertigkeit (hellorange) dargestellt. Der gestrichelte Block repräsentiert beliebig viele weitere Fertigkeiten auf unterschiedlichen Ebenen aus unterschiedlichen Kategorien. Die beiden hellblauen Fertigkeiten sind Planungsfertigkeiten, die oberste grau hinterlegte Fertigkeit repräsentiert eine Systemfertigkeit. Diese Systemfertigkeit könnte beispielsweise ein Fahrmanöver repräsentieren, und die untergeordneten Fertigkeiten sind für dessen Ausführung erforderlich.

6.5.2.1 Knoten im Fertigkeitengraph

Ein Knoten im Fertigkeitengraph repräsentiert eine Fertigkeit und hat Abhängigkeiten zu untergeordneten Fertigkeiten. Diese Abhängigkeiten werden in Form von Anforderungen an die Informationen aus einem untergeordneten Knoten und an deren Verfügbarkeit

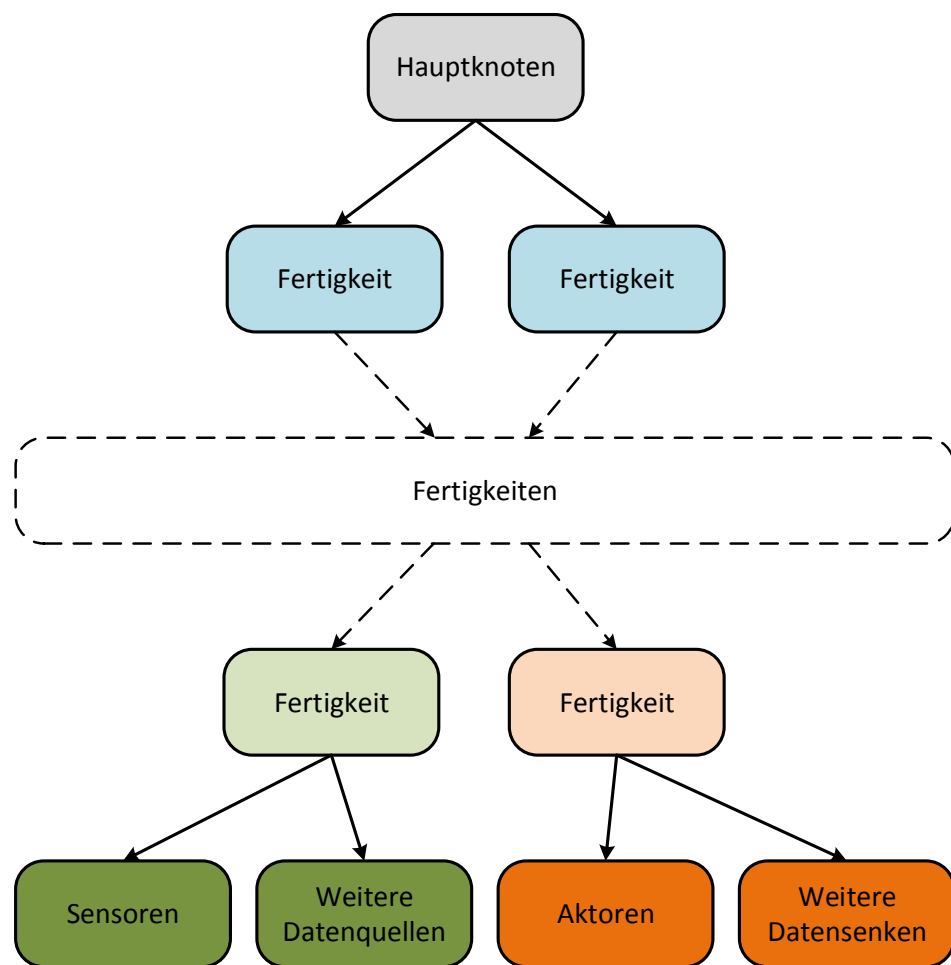


Abbildung 6.12: Konzeptionelle Struktur des Fertigkeitengraphen; Grau: Systemfertigkeiten, Hellblau: Planungsfertigkeiten, Hellgrün: Wahrnehmungsfertigkeiten, Grün: Sensoren und weitere Datenquellen, Hellorange: Aktionsfertigkeiten, Orange: Aktoren und weitere Datensenken; Der gestrichelte Block repräsentiert beliebig viele weitere Fertigkeiten auf unterschiedlichen Ebenen aus unterschiedlichen Kategorien.

formuliert. Im Rahmen der Item-Definition werden hier keine Metriken für die Qualität der Fertigkeiten erstellt, da diese implementierungsabhängig sind. Dieser Schritt folgt erst wenn der Fertigkeitengraph in einen Fähigkeitsgraph überführt wird (*Kapitel 10.5*). Im Fertigkeitengraph sind die Abhängigkeiten zwischen den Fertigkeiten sichtbar. Übergeordnete Fertigkeiten hängen von Sensoren / Datenquellen und Aktoren / Datensenzen ab.

6.5.2.2 Kanten im Fertigkeitengraph

Eine Kante im Fertigkeitengraph symbolisiert eine Abhängigkeit zwischen einem übergeordneten und einem untergeordneten Fertigkeitsknoten. Die Kante enthält einen Vektor mit Anforderungen, die von einer untergeordneten Fertigkeit erfüllt werden müssen, damit die übergeordnete Fertigkeit zur Verfügung steht. Diese Abhängigkeiten und deren Anforderungen können im Entwicklungsprozess vom Anwendungsfall des automatisierten Fahrzeugs und den Anforderungen an die Fahrmanöver abgeleitet werden. Die konkreten Metriken, die Teil des Vektors von Anforderungen sind, hängen von der Implementierung ab und werden daher erst im Fähigkeitsgraph spezifiziert.

6.5.3 Erstellung des Fertigkeitengraphen

Die Erstellung des Fertigkeitengraphen erfolgt in drei Schritten. Zuerst werden für die erforderlichen Fahrmanöver jeweils eigene Fertigkeitengraphen erstellt, mit dem jeweiligen Fahrmanöver als Hauptknoten. Diese werden im nächsten Schritt zusammengeführt, sodass ein Fertigkeitengraph entsteht, der auf den oberen Ebenen die Fahrmanöver enthält und darunter alle erforderlichen Fertigkeiten. Fahrmanöver können voneinander abhängig sein, wodurch diese nicht alle auf derselben Ebene modelliert werden können. Nachdem alle Fahrmanöver in einem Fertigkeitengraph modelliert sind, wird dieser Fertigkeitengraph mit zusätzlichen übergeordneten Fertigkeiten zusammengeführt, und die Vereinigungsmenge aller Fertigkeiten und deren Abhängigkeiten bilden den Fertigkeitengraph des Gesamtsystems. Die zusätzlichen Fertigkeiten sind nicht direkt den Fahrmanövern zuzuordnen, sondern davon losgelöst. Beispielsweise ist die Interaktion mit den Passagieren nicht an ein bestimmtes Fahrmanöver gekoppelt. Als Ergebnis steht ein Modell der erforderlichen Fertigkeiten für den gewünschten Anwendungsfall des Systems zur Verfügung, die sich an den Fertigkeiten des Menschen bei der Fahrzeugführung orientiert.

6.5.3.1 Granularität der Fertigkeiten

Bei der Modellierung des Fertigkeitengraphen stellt sich die Frage nach der Granularität der Fertigkeiten. Hierfür sind die folgenden Grundsätze zu beachten.

- Jede Fertigkeit sollte mindestens zwei untergeordnete Fertigkeiten haben, da sich die Fertigkeit sonst mit der untergeordneten oder der übergeordneten Fertigkeit zusammenfassen lässt. Ausgenommen hiervon sind die Sensoren, Datenquellen, Aktoren und Datensenzen. Diese haben keine Abhängigkeiten nach unten.
- Die Fertigkeiten sollten soweit möglich von implementierungsspezifischen Details unabhängig sein. Dadurch werden bei der Erstellung der Item-Definition Vorgriffe auf die Implementierung verhindert, die später zu Konflikten, beispielsweise zu einer nicht gegebenen Realisierbarkeit, führen könnten. Ein Nachteil davon ist, dass einzelne Fertigkeiten technisch nicht realisierbar sein können, wodurch das gesamte System ebenfalls nicht realisierbar sein kann (Maurer, 2016).

6.5.3.2 Erstellung der Fertigkeitengraphen für die Fahrmanöver

Beginnend beim Hauptknoten wird der Fertigkeitengraph für ein Fahrmanöver schrittweise erstellt. Jeder Fertigkeitsknoten wird entsprechend weiter verfeinert, bis elementare Fertigkeiten auf der untersten Ebene erreicht sind. Eine elementare Fertigkeit lässt sich nicht weiter verfeinern oder eine Verfeinerung bedarf einem Vorgriff auf eine noch nicht bekannte Implementierung. Elementare Fertigkeiten hängen entweder von Sensoren oder anderen Datenquellen oder von Aktoren oder anderen Datensenzen ab. Im Folgenden werden beispielhaft die Fahrmanöver Folgen und Sicheres Anhalten modelliert.

Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Folgen In *Abbildung 6.13* ist ein Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Folgen dargestellt. Der gewählte Grad der feinsten Granularität in *Abbildung 6.13* reicht an dieser Stelle aus, um das grundlegende Konzept der Modellierung eines automatisierten Fahrzeugs zu zeigen. Der Fertigkeitengraph beinhaltet bereits zahlreiche Fertigkeiten, die auch für andere Fahrmanöver erforderlich sind. Auf der höchsten Ebene ist das *Fahrmanöver Folgen* als Systemfertigkeit (grau) modelliert. Dieses Fahrmanöver enthält sowohl das Folgen des Fahrstreifens, den das vollständig automatisierte Fahrzeug nutzen soll, als auch die Berücksichtigung weiterer Verkehrsteilnehmer. Nur wenn beide Fertigkeiten verfügbar sind, ist das Fahrmanöver vollständig ausführbar. Die Planungsfertigkeit *Fahrstreifen folgen* (hellblau) beinhaltet die Berechnung eines Ziels, das über die Fahrzeugregelung angefahren werden soll. Zu beachten ist hier, dass es sich nicht nur um durch Markierungen begrenzte Fahrstreifen handeln kann, sondern auch um den gewählten Weg in einem nicht klar zugeordneten Teil des Verkehrsraums. Die Fertigkeit *Fahrstreifen Folgen* ist abhängig von der Wahrnehmung der Fahrstreifen und der Regelung der Fahrdynamik. Die Fertigkeit *Verkehrsteilnehmer folgen* ergänzt das Folgen des Fahrstreifens um die Berücksichtigung der weiteren Verkehrsteilnehmer. Dies können vorausfahrende, entgegenkommende, querende und plötzlich auftretende Verkehrsteilnehmer sein. Damit diesen gefolgt werden kann, muss ein Verkehrsteilnehmer ausgewählt werden (Fertigkeit *Zielelement auswählen*), der für die Längsführung maßgebend ist und die Fahrzeugdynamik muss geregelt werden können.

Die Wahrnehmungsfertigkeiten (hellgrün) *Fahrstreifenverlauf wahrnehmen*, *Szenerie wahrnehmen* und *Bewegliche Elemente wahrnehmen* nutzen die Umfeldsensorik und zusätzlich die Fertigkeit *Eigenbewegung schätzen*. Sie liefern die notwendigen Informationen für die Planungsfertigkeiten. Die Aktionsfertigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* nutzt die Schätzung der Eigenbewegung ebenfalls, da die fahrdynamischen Istgrößen für eine Regelung erforderlich sind. Zusätzlich sind zur Bewegung des Fahrzeugs die Fertigkeiten *Verzögern*, *Beschleunigen* und *Fahrtrichtung vorgeben* erforderlich. Diese nutzen die Aktoren des Fahrzeugs.

Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Sicheres Anhalten Als zweites Beispiel ist in *Abbildung 6.14* der Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Sicheres Anhalten dargestellt. Dieser enthält teils dieselben Fertigkeiten wie der Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Folgen in *Abbildung 6.13*. Übergeordnet ist die Systemfertigkeit *Sicheres Anhalten*. Diese teilt sich nun in die drei weiteren Systemfertigkeiten *Nothalt*, *Abfahren der letzten geplanten Bahn* und *Anhalten an geeigneter Stelle*. Die Fertigkeit *Nothalt* (siehe *Kapitel 6.4*) benötigt nur die Aktionsfertigkeit *Verzögern*, da das Fahrzeug hier in den Stillstand gebremst wird und dort gehalten wird. Die Fertigkeit *Verzögern* beinhaltet auch die Arretierung der Bremse im Stillstand. Eine Lenkfunktion ist aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit im Stadtverkehr nicht erforderlich. Es ist zu beachten, dass der Nothalt die Aktion ist, die

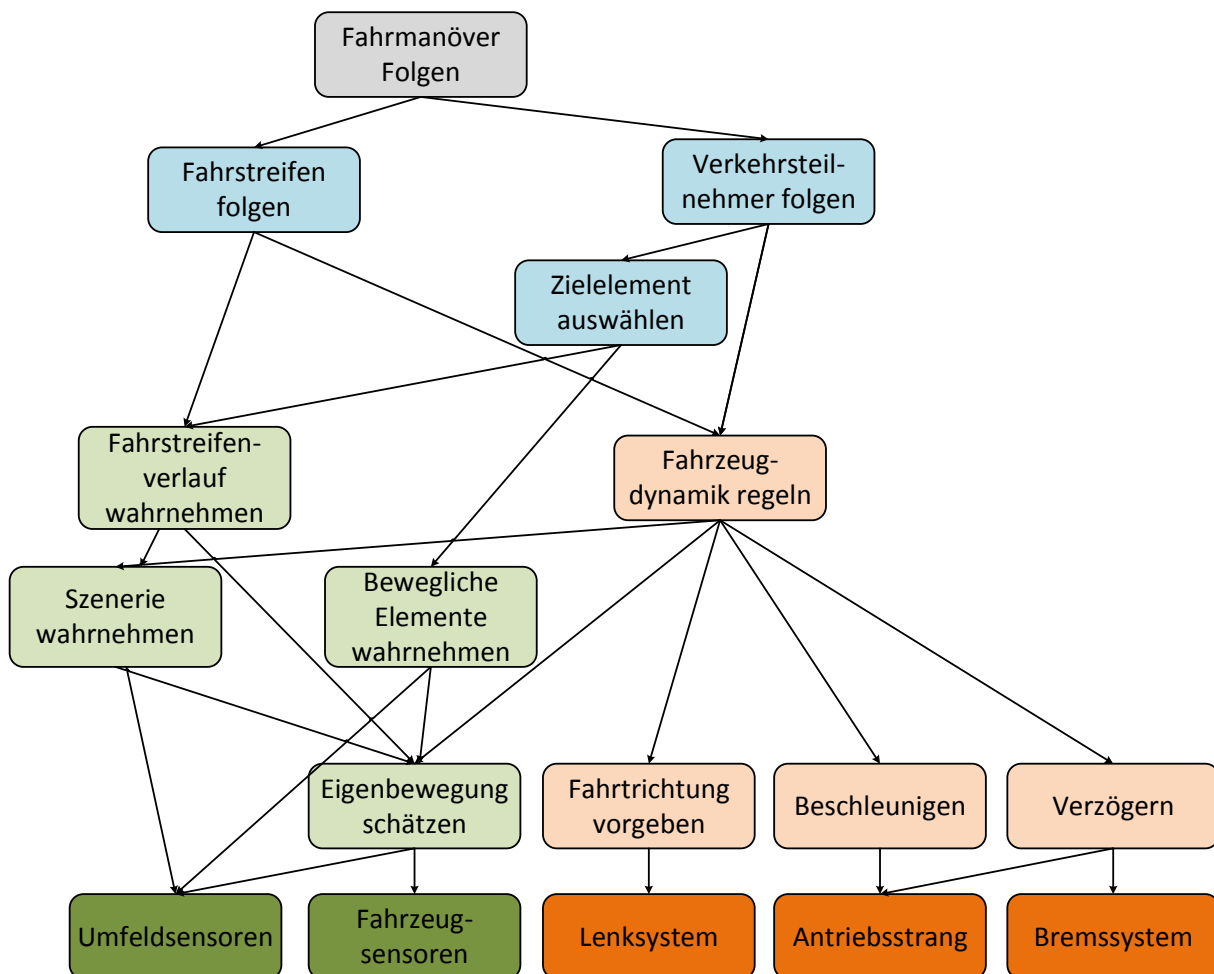


Abbildung 6.13: Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Folgen; Grau: Systemfähigkeiten, Hellblau: Planungsfähigkeiten, Hellgrün: Wahrnehmungsfähigkeiten, Grün: Sensoren und weitere Datenquellen, Hellorange: Aktionsfähigkeiten, Orange: Aktoren und weitere Datenbanken

das Fahrzeugführungssystem als letzte Alternative ausführt, falls keine andere Handlungsmöglichkeit zur Verfügung steht. Die Fertigkeit *Abfahren der letzten geplanten Bahn* nutzt zusätzlich die Querführung des Fahrzeugs. Sie ist daher abhängig von *Fahrzeugdynamik regeln* und von der letzten geplanten Bahn. Zur Planung einer Bahn steht die Planungsfertigkeit *Bahnplanung* zur Verfügung. Diese wird jedoch in der in *Abbildung 6.15* gezeigten Granularität nicht dargestellt, sondern ist Teil der Systemfertigkeit *Fahrmanöver Folgen*. Durch die Fertigkeit *Abfahren der letzten geplanten Bahn* kann das Fahrzeug kontrolliert in den Stillstand gebremst werden und gleichzeitig der letzten geplanten Bahn folgen. Die Fertigkeit *Anhalten an geeigneter Stelle* benötigt als Voraussetzung weitere Fahrmanöver und daher hängt diese von der Verfügbarkeit der Fertigkeiten *Fahrmanöver Folgen* und *Fahrmanöver Fahrstreifenwechsel* ab. Diese Abhängigkeiten erschweren im Fehlerfall das sichere Verlassen des Straßenverkehrs. Es erscheint unrealistisch, dass ein Fehler im System auftritt, der einerseits das Weiterfahren auf dem Fahrstreifen verhindert, andererseits der Verkehr immer noch sicher verlassen werden kann. Wahrscheinlicher ist in einem solchen Fall ein kontrolliertes Anhalten am äußeren Rand eines Fahrstreifens. Der Stillstand am Fahrstreifenrand ist dennoch sicherer als mitten auf einem Fahrstreifen wie es beim Nothalt und Abfahren der letzten geplanten Bahn möglich sein kann.

6.5.3.3 Auswahl der übergeordneten Fertigkeiten

Die übergeordneten Fertigkeiten, die zusätzlich zu den Fertigkeiten der Fahrmanöver modelliert werden, sollen Fertigkeiten beschreiben, die nicht direkt mit der Ausführung von Fahrmanövern zusammen hängen. Hierzu zählen beispielsweise die Routenplanung, die Auswahl des zu fahrenden Fahrmanövers (siehe Fertigkeit *Fahrmanöver Auswahl* in *Abbildung 6.16*), die Unterstützung der Insassen und die Überwachung der Ladung (*Kapitel 1.1.2*). Auch die Interaktion mit den Insassen über die Mensch-Maschine-Schnittstelle wird mit diesen Fertigkeiten modelliert.

6.5.3.4 Zusammenführung der Fertigkeitengraphen und der übergeordneten Fertigkeiten

Nachdem die beiden Fahrmanöver modelliert wurden, werden die entstandenen Fertigkeitengraphen zusammengeführt. In *Abbildung 6.15* ist das Resultat aus den Fertigkeiten *Fahrmanöver Folgen* und *Sicheres Anhalten* dargestellt.

Die Wahrnehmungs- und Aktionsfertigkeiten sind identisch zu denen im Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Folgen. Es zeigt sich auch, dass für ein sicheres Anhalten an einer geeigneten Stelle alle Fertigkeiten des Fahrmanövers Folgen erforderlich sind. Das bedeutet, dass ein Anhalten, beispielsweise auf einem Seitenstreifen, oder das Verlassen des Verkehrs, eine hohe Verfügbarkeit dieser Fertigkeiten erfordert.

Im nächsten Schritt werden die übergeordneten Fertigkeiten hinzugefügt, sodass ein Gesamtsystem, das die *Fahrmanöver Folgen* und *Sicheres Anhalten* ausführen kann, modelliert ist. Diese sind eine übergeordnete Fertigkeit zur Auswahl des Fahrmanövers und weitere Fertigkeiten, die eine Routenplanung basierend auf einer digitalen Karte und Nutzereingaben ermöglichen. Der in *Abbildung 6.16* dargestellte Fertigkeitengraph stellt dieses System dar. Es ist in der Lage, eine Route nach Nutzereingaben zu planen, einem Fahrstreifen zu folgen und dabei weitere Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen und falls erforderlich sofort oder kontrolliert anzuhalten. Für weitere Fahrmanöver müssten zusätzliche Fertigkeiten hinzugefügt werden. Für eine Implementierung ist eine Verfeinerung des Graphen erforderlich.

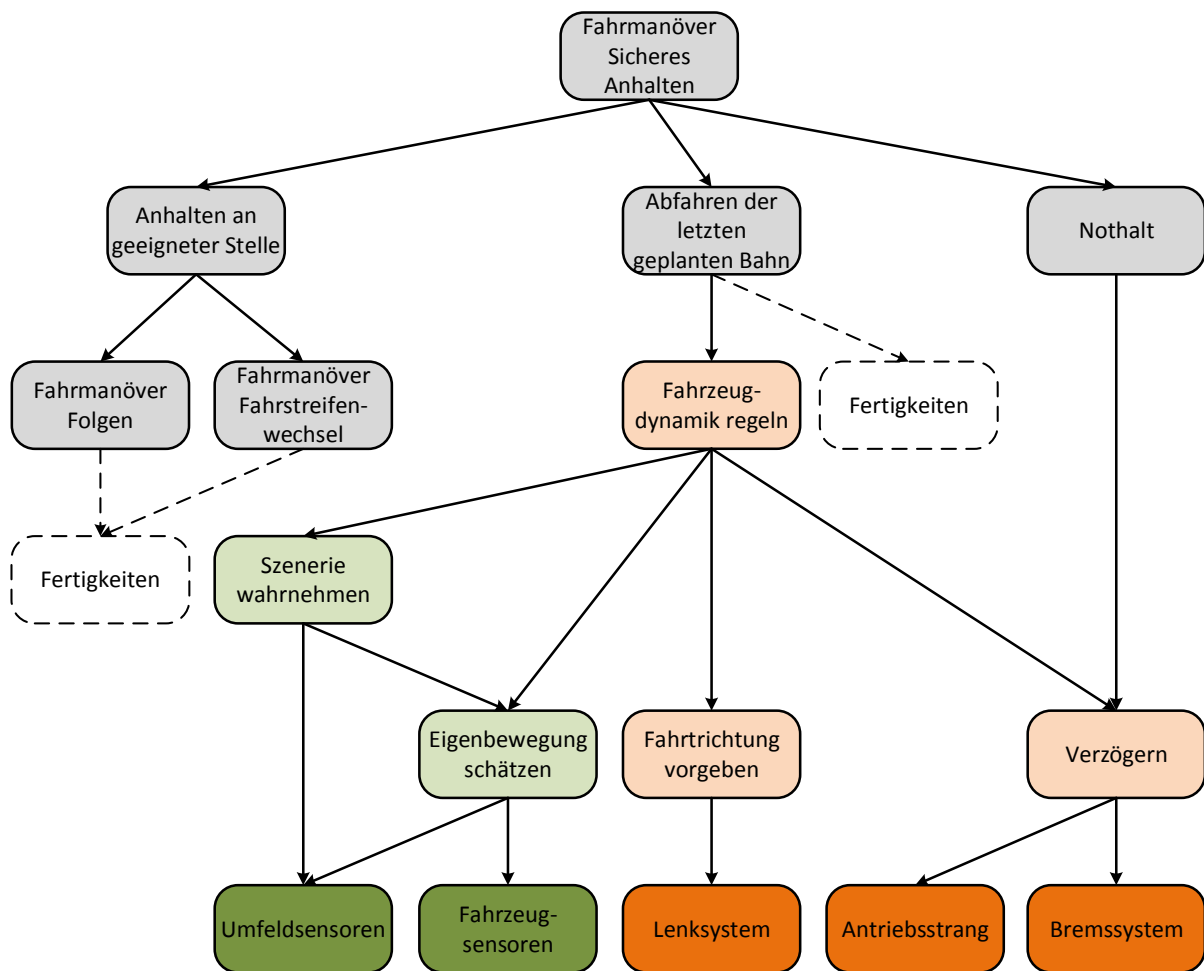


Abbildung 6.14: Fertigkeitengraph für das Fahrmanöver Sicheres Anhalten; Grau: Systemfertigkeiten, Hellblau: Planungsfertigkeiten, Hellgrün: Wahrnehmungsfertigkeiten, Grün: Sensoren und weitere Datenquellen, Hellorange: Aktionsfertigkeiten, Orange: Aktoren und weitere Datenquellen; Gestrichelt sind weitere Fertigkeiten angedeutet, die für einen vollständigen Graph erforderlich wären

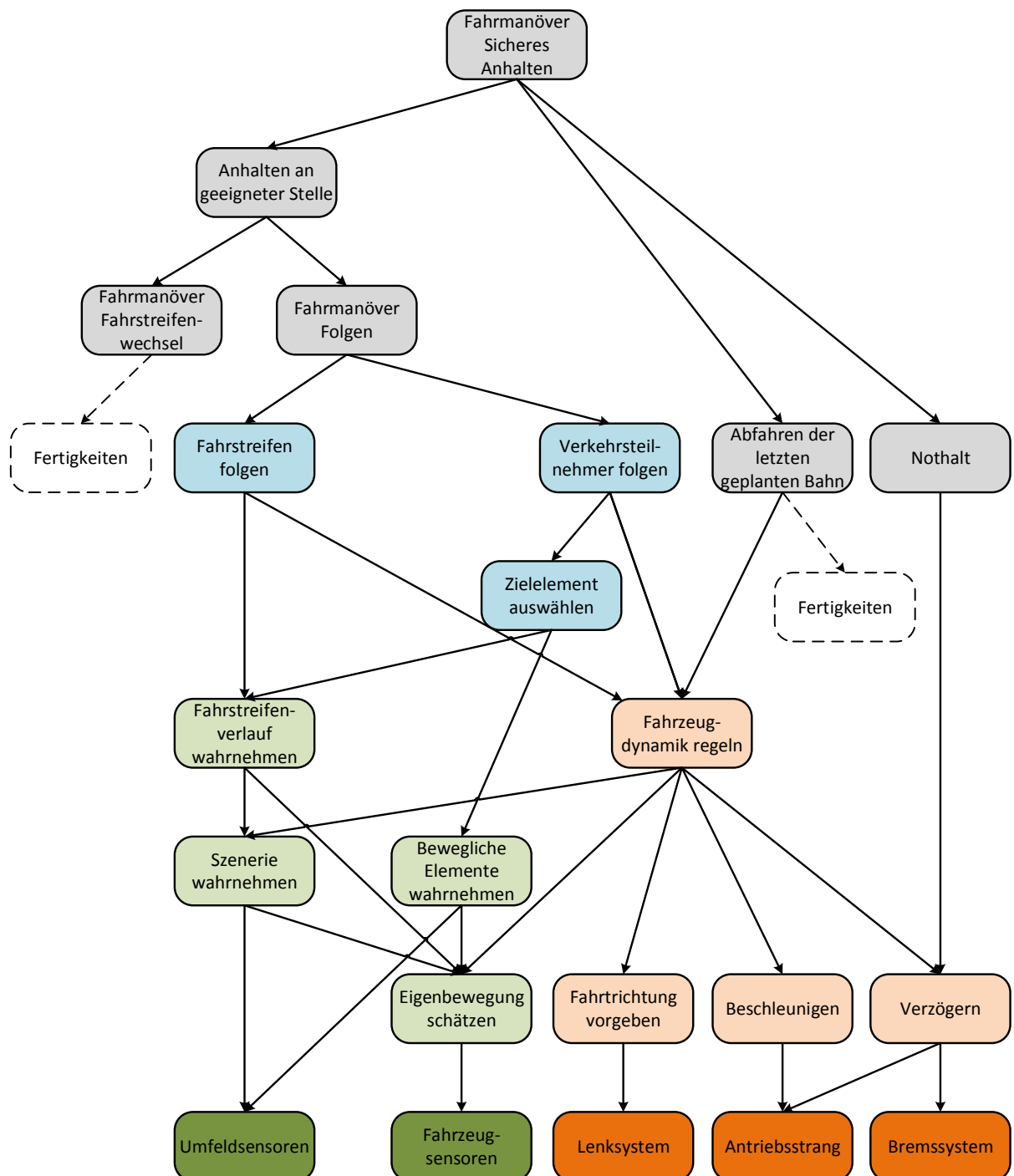


Abbildung 6.15: Fertigkeitengraph für die Fahrmanöver Folgen und Sicheres Anhalten; Grau: Systemfähigkeiten, Hellblau: Planungsfähigkeiten, Hellgrün: Wahrnehmungsfähigkeiten, Grün: Sensoren und weitere Datenquellen, Hellorange: Aktionsfähigkeiten, Orange: Aktoren und weitere Datensensoren; Gestrichelt sind weitere Fertigkeiten angedeutet, die für einen vollständigen Graph erforderlich wären

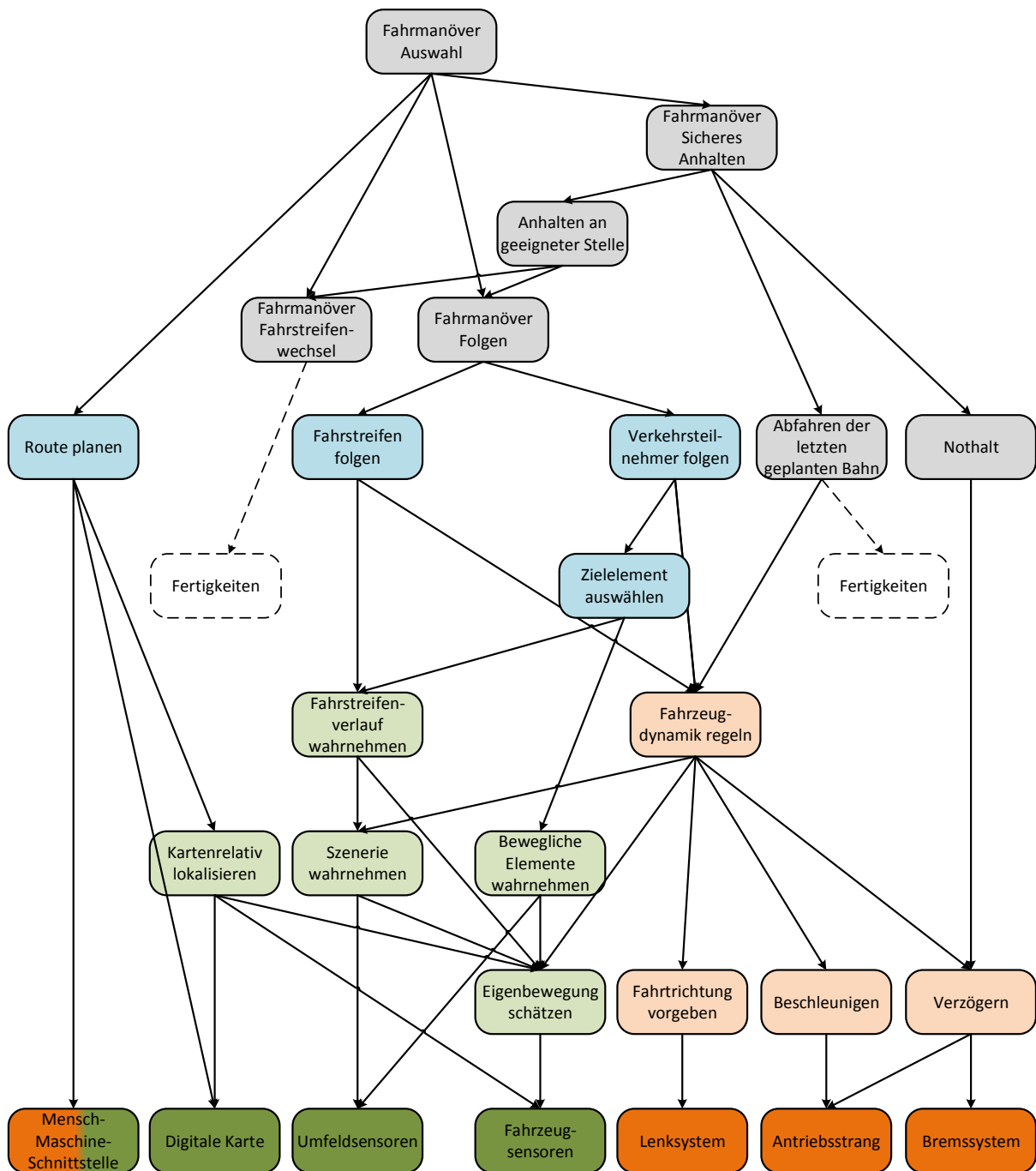


Abbildung 6.16: Fertigkeitsgraph für die Fahrmanöver Folgen und Sicheres Anhalten mit übergeordneten Systemfertigkeiten; Grau: Systemfertigkeiten, Hellblau: Planungsfertigkeiten, Hellgrün: Wahrnehmungsfertigkeiten, Grün: Sensoren und weitere Datenquellen, Hellorange: Aktionsfertigkeiten, Orange: Aktoren und weitere Datensensoren; Gestrichelt sind weitere Fertigkeiten angedeutet, die für einen vollständigen Graph erforderlich wären

6.5.4 Zusammenfassung

Durch die Modellierung des Fertigkeitengraphen können die erforderlichen Fertigkeiten des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess modelliert werden. Sind in früheren Entwicklungen ähnliche Fertigkeiten durch ein implementiertes System realisiert worden, so können diese wiederverwendet werden. Für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf reicht es aus, einen vollständigen Fertigkeitengraph zu modellieren. Dieser kann genutzt werden, um Teilfunktionen des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf abzuleiten und zu entwickeln. Außerdem können vorhandene Fertigkeitengraphen kombiniert werden, um den Funktionsumfang eines Systems zu erhöhen. Bei einer Kombination von bestehenden Graphen kann es erforderlich sein, die Anforderungen an den Kanten neu zu formulieren, wenn beispielsweise Systeme eines niedrigeren Automatisierungsgrades zu einem Gesamtsystem mit einem höheren Automatisierungsgrad kombiniert werden sollen.

Der Fertigkeitengraph könnte im nächsten Entwicklungsschritt genutzt werden, um eine funktionale Systemarchitektur zu entwickeln, die als Grundlage für die technische Entwicklung des Systems verwendet wird. Die Entwicklung der funktionalen Systemarchitektur hat das Ziel, alle Fertigkeiten des Fertigkeitengraphen mit der erforderlichen Qualität in ein technisches System zu überführen.

Im Projekt Stadtpilot entstand die funktionale Systemarchitektur bereits früh im Projekt und wurde iterativ weiterentwickelt. Beim Ursprung handelte es sich um eine Weiterentwicklung der funktionalen Systemarchitektur nach Maurer (2000) durch Wille (2012) und zuletzt durch Matthaei (2015). In der vorliegenden Arbeit wird diese funktionale Systemarchitektur genutzt. Dies widerspricht dem vorgestellten Ansatz, widerlegt diesen jedoch nicht, da eine Entwicklung der funktionalen Systemarchitektur aus dem Fertigkeitengraph dennoch möglich ist.

Je größer das Wissen über das System an sich und die Implementierung ist, um so detaillierter lässt sich der Fertigkeitengraph modellieren. Dies hängt vom Vorwissen im Entwicklungsprozess und der Nutzung von bestehenden Systemen ab. Der Fertigkeitengraph zeigt Abhängigkeiten über mehrere Fertigkeitenebenen hinweg und ermöglicht damit eine Darstellung der Fortpflanzung von Unsicherheiten in einem System, sowie eine Darstellung der Fehlerfortpflanzung und der funktionalen Degradation. Dies wird in den Kapiteln 10.5 und 10.6 erläutert.

6.6 Funktionale Systemarchitektur zur Umsetzung der Fertigkeiten

Im Projekt Stadtpilot diente die von Wille (2012, Kapitel 7.2) entwickelte funktionale Systemarchitektur bis 2013 als Grundlage. Das Fahrzeugführungssystem im Versuchsträger Leonie wurde nach dieser entwickelt und kam zu der ersten öffentlichen Demonstration des Versuchsträgers im Jahr 2010 zum Einsatz. Bei der technischen Umsetzung lag ein Schwerpunkt auf der Lokalisierung des Fahrzeugs relativ zu einer hochgenauen digitalen Karte. Die Abhängigkeit von der digitalen Karte und einer absoluten Lokalisierung relativ zu dieser Karte mittels der Nutzung des globalen Satellitennavigationssystems GPS inklusive Korrekturdaten, die über Mobilfunk empfangen wurden, führte zu einem eingeschränkten Einsatzbereich des Versuchsträgers.

Matthaei (2015, Kapitel 5) hat unter Berücksichtigung der Systemarchitekturen von Maurer (2000), Wille (2012) und anderen eine generalisierte Version der funktionalen Systemarchitektur entwickelt. Diese wird derzeit im Projekt Stadtpilot umgesetzt und weiterentwickelt. Eine Besonderheit in der Forschungsarbeit von Matthaei (2015) ist der Fokus auf eine wahrnehmungsgestützte Lokalisierung des Fahrzeugs. Diese reduziert die angesprochene Abhängigkeit von GPS-Signalen, Korrekturdaten und hochgenauen digitalen Karten. Die Umsetzung dieses Ansatzes steht derzeit im Projekt Stadtpilot noch aus.

In *Abbildung 6.17* ist eine Weiterentwicklung und Detaillierung der funktionalen Systemarchitektur von Matthaei (2015) abgebildet. Diese ist ein Ergebnis der laufenden Diskussionen der Arbeitsgruppe Elektronische Fahrzeugsysteme am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig. In der vorliegenden Arbeit wird diese Systemarchitektur eines Fahrzeugführungssystems für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf als Grundlage zur Umsetzung der für einen sicheren Betrieb erforderlichen Fertigkeiten verwendet. Der Autor der vorliegenden Arbeit hat insbesondere die Aspekte der Selbstwahrnehmung und Selbstrepräsentation in die Diskussion eingebracht. Außerdem wurden die Schnittstellen zwischen der Führung und der Stabilisierung kontrovers diskutiert. Aktuell wird ein Ansatz verfolgt, bei dem aus dem Block Führung eine Sollpose an die Stabilisierung geschickt wird. Die Generierung und Auswahl einer Trajektorie erfolgt im Block Stabilisierung. Alternative Ansätze, wie zum Beispiel die modellprädiktive Regelung, kombinieren die Ermittlung einer Sollpose mit der Generierung einer Trajektorie, wodurch eine klare Trennung der beiden Blöcke und somit der beiden Ebenen nicht mehr möglich ist. Auch aktuell diskutierte Ansätze des maschinellen Lernens, wie zum Beispiel Deep Driving¹⁶, bei denen Sensordaten der Umfeldwahrnehmung direkt in Stellgrößen der Aktorik umgerechnet werden, folgen der Trennung von funktionalen Blöcken über mehrere Ebenen hinweg nicht. Dies erschwert die Überwachung der Fähigkeiten im Betrieb. Daher werden derartige Ansätze im Projekt Stadtpilot nicht vorrangig verfolgt.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über funktionale Komponenten der Systemarchitektur gegeben, die eine Selbstwahrnehmung und eine Selbstrepräsentation ermöglichen. Diese Auswahl erfolgt, da die Selbstwahrnehmung und Selbstrepräsentation zentrale Elemente des Sicherheitskonzepts in *Kapitel 10.5* der vorliegenden Arbeit sind.

Struktur der funktionalen Systemarchitektur

Die funktionale Systemarchitektur teilt sich in drei übergeordnete Bereiche ein. Diese sind *Lokalisierung & Karten*, *Umfeldwahrnehmung & Selbstwahrnehmung* und *Planung & Regelung*. Betrachtet man *Abbildung 6.17* als Matrix, sind dies die Spalten. Die Spalte Lokalisierung & Karten enthält funktionale Komponenten, die das Fahrzeug relativ zur Welt betrachten. Bei den weiteren Spalten ist das Fahrzeug der Mittelpunkt und alle funktionalen Komponenten betrachten die Welt relativ zum Fahrzeug. Die Zeilen in *Abbildung 6.17* sind nach der Art der in dieser Ebene getroffenen Entscheidungen und der dafür notwendigen Informationen eingeteilt. Diese sind die *strategische* (enthält Komponenten der Navigation), die *taktische* (enthält Komponenten der Führung) und die *operative Ebene* (enthält Komponenten der Stabilisierung). Diese Einteilung wurde auch von Nothdurft (2014, Kapitel 4) angewendet, der die Systemarchitektur nach Wille (2012) in einer anderen Form dargestellt hat. Die

¹⁶Deep Driving ist abgeleitet von Deep Neural Network Driving, freie Übersetzung: Fahren mit mehrschichtigen neuronalen Netzwerken)

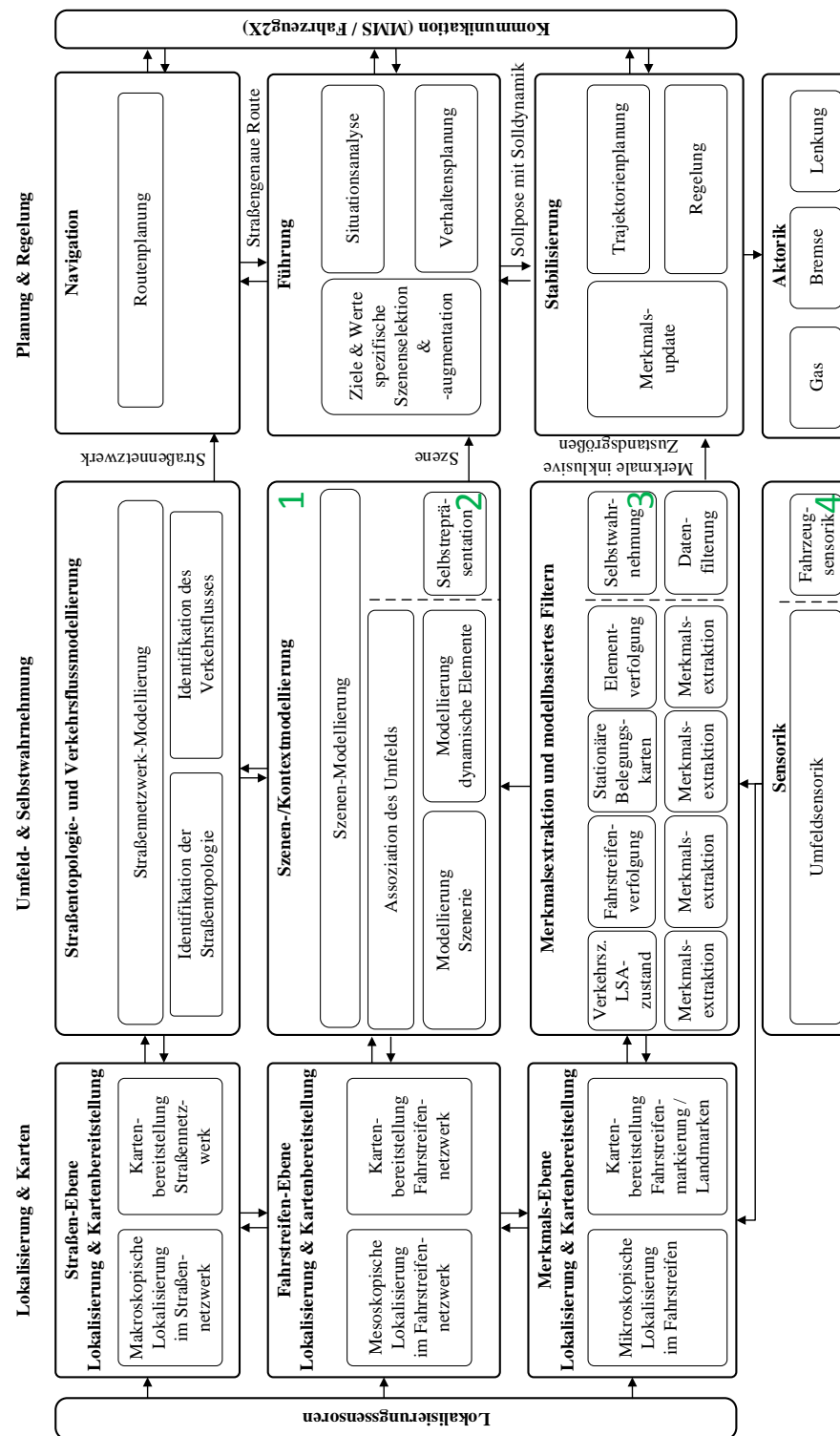


Abbildung 6.17: Funktionale Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge als Ergebnis der Diskussion in der Arbeitsgruppe Elektronische Fahrzeugsysteme am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig; Die Abbildung der Systemarchitektur wurde von Schuldt (2016) erstellt. Die Zahlen 1-4 markieren die funktionalen Komponenten, die für das Sicherheitskonzept besonders wichtig sind.

Ebenen korrelieren mit den Ebenen Navigation, Führung und Stabilisierung nach Donges (1982). Neben den drei genannten Spalten werden auch die Kommunikation mit der Umwelt und dem Fahrer und die Sensoren und Aktoren betrachtet.

Eine ausführliche Beschreibung der Systemarchitektur liefert Matthaei (2015, Kapitel 5 und 6). In der vorliegenden Arbeit steht die Sicherheit für den Betrieb des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf im Fokus. Daher werden in diesem Kapitel nur die Elemente der Systemarchitektur vorgestellt, die für das Sicherheitskonzept relevant sind.

Kontextmodellierung

In der Kontextmodellierung (1 in *Abbildung 6.17*) werden die unbeweglichen und die beweglichen Objekte zusammengefasst und die Eigenschaften des automatisierten Fahrzeugs zu einer Selbstrepräsentation aggregiert (Matthaei, 2015; Nothdurft, 2014; Knoll und Christaller, 2000). Das Kontextmodell enthält somit alle Informationen der aktuellen Szene, außer der Intention des Ego-Fahrzeugs und der Fahrmission. Basierend auf diesen Daten können Fahrentscheidungen auf der taktischen Ebene getroffen werden. Die Selbstrepräsentation ist neben der Umfeldrepräsentation ein wesentlicher Bestandteil der Kontextmodellierung (Matthaei, 2015, Kapitel 5.4).

Selbstrepräsentation

Zur sicheren Auswahl und Ausführung der Fahrmanöver muss ein Fahrzeugführungssystem neben dem Umfeld seinen eigenen Zustand und den des Fahrzeugs kennen und die aktuelle Leistungsfähigkeit richtig ermitteln, damit bei den Fahrmanövern kein unzumutbares Risiko eingegangen wird. Hierzu wird die Selbstrepräsentation (2 in *Abbildung 6.17*) basierend auf einem Fähigkeitengraph erstellt (*Kapitel 10.5*). Die Leistungsfähigkeit des Ego-Fahrzeugs bildet die Qualität ab, mit der die funktionalen Komponenten ausgeführt werden können. Die Verfügbarkeit von funktionalen Komponenten beeinflusst die Fähigkeitenlevel im Fähigkeitengraph, wodurch Fahrmanöver verhindert werden, die entweder unsicher sind oder gar nicht ausgeführt werden können. Die Daten für diese Qualitätsbewertung werden in der Selbstwahrnehmung erfasst.

Selbstwahrnehmung

Unter Selbstwahrnehmung (3 in *Abbildung 6.17*) wird die Erfassung der Zustandsgrößen und der Eigenschaften des Fahrzeugs und des Fahrzeugführungssystems verstanden (Knoll und Christaller, 2000). Aufgrund der Bedeutung für die Sicherheit beim Betrieb des vollständig automatisierten Fahrzeugs wird dieser funktionalen Komponente in der vorliegenden Arbeit das *Kapitel 10.4* gewidmet.

Fahrzeugsensorik

Die Informationen zur Selbstwahrnehmung werden von der Fahrzeugsensorik (4 in *Abbildung 6.17*) gemessen. Dazu gehören beispielsweise Fahrdynamiksensoren wie in Mörbe (2015) und Mitschke und Wallentowitz (2014, Kapitel 26) beschrieben. Mit der Fahrzeugsensorik werden nicht nur die fahrdynamischen Größen erfasst, sondern auch die internen Zustände der verbauten Sensorik und der weiteren Hardware. Außerdem werden interne Parameter des Fahrzeugführungssystems, wie Rechenlast, Netzwerklast, Zykluszeiten und Lebenszeichen von Komponenten ermittelt. Diese Daten stehen der Selbstwahrnehmung zur Verfügung.

6.7 Fazit

In diesem Kapitel wurde der in *Kapitel 5* vorgestellte erweiterte Entwicklungsprozess exemplarisch auf das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf angewendet. Die Nutzung von pathologischen Szenarien, die Ableitung von sicheren Zuständen und sicherem Sollverhalten, die Auswahl der Menge von Fahrmanövern, der Fertigkeitsgraph als neues Element im Entwicklungsprozess und die funktionale Systemarchitektur erlauben eine Modellierung des zu entwickelnden Systems, das bereits in dieser frühen Phase einen Fokus auf den sicheren Betrieb legt. Besonders die Erweiterung der Erstellung der Item-Definition um den Fertigkeitsgraph erleichtert die Entwicklung einer Selbstrepräsentation, die für einen sicheren Betrieb erforderlich ist. Dies wurde bei bisherigen Ansätzen nicht explizit berücksichtigt.

Der sichere Betrieb eines vollständig automatisierten Fahrzeugs setzt einen vollständigen Funktionsumfang des Systems voraus. Sobald die Leistungsfähigkeit der Systemfunktionen nachlässt oder diese ausfallen, muss das Fahrzeugführungssystem dennoch einen sicheren Zustand erhalten. Der folgende dritte Teil der vorliegenden Arbeit widmet sich einem funktionalen Sicherheitskonzept, das den sicheren Betrieb des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf ermöglicht.

Hierzu werden die bereits beschriebenen pathologischen Szenarien betrachtet und zusätzlich der Fähigkeitsgraph für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf entwickelt. Durch die darauf aufbauende Selbstrepräsentation können Fahrentscheidungen sicher getroffen werden und das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs mit dem Fokus auf einen sicheren Betrieb realisiert werden.

7 Selbstkritik

Aufgrund des Aufwands zur Erstellung einer vollständigen Item-Definition nach dem vorgestellten Entwicklungsprozess konnte dies in der vorliegenden Arbeit nicht erreicht werden. Eine erfolgreiche Evaluation des Entwicklungsprozesses lässt sich nur durch eine erfolgreiche Entwicklung und Freigabe, in diesem Fall eines vollständig automatisierten Fahrzeugs für den Stadtverkehr, durchführen, oder durch einen Fehlschlag der Entwicklung oder Freigabe widerlegen. Sowohl die Entwicklung als auch die Verfahren zur Freigabe sind noch Forschungsgegenstand. Daher bleibt insbesondere das *Kapitel 6* ein Gedankenexperiment, das einen Weg aufzeigt, wie eine Entwicklung durchgeführt werden kann.

Der resultierende Anforderungskatalog ist nicht vollständig. Auch ist offen, wie eine Vollständigkeit erreicht und validiert werden kann.

Die Erweiterung des Entwicklungsprozesses in der Konzeptphase der Entwicklung durch die Aufnahme von Szenarien und insbesondere pathologischen Szenarien und die Integration des Fertigkeitengraphen erweitern das von der Norm ISO 26262 vorgeschlagene Vorgehen um zwei wichtige Aspekte.

Für jeden Prozessschritt des vorgestellten Prozesses muss der Stand der Forschung berücksichtigt werden. Dies ist eine Aufgabe für weitere Forschungsarbeiten, beispielsweise zur Identifikation von pathologischen Szenarien, der Identifikation von sicheren Zustände, dem Ableiten des Sollverhaltens und zur Erstellung der Fertigkeitengraphen.

Teil III
Funktionales Sicherheitskonzept für
das vollständig automatisierte
Fahrzeug auf Abruf

Einführung

Das Ziel in *Teil III* der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines funktionalen Sicherheitskonzept mit der Nutzung von Fähigkeitengraphen zur automatisierten Fahrzeugführung. In diesem Teil werden zunächst die Ziele und Anforderungen an ein funktionales Sicherheitskonzept identifiziert, sowie das Vorgehen in diesem Kapitel beschrieben (*Kapitel 8*). Wie bereits in *Teil II* der vorliegenden Arbeit, basiert das Vorgehen in diesem Teil auf den Erfahrungen aus dem Projekt Stadtpilot. Zusätzlich werden Ergebnisse des Vorgehens bei der Entwicklung des Experimentalfahrzeugs MOBILE von Bergmiller (2014) als Grundlage verwendet. Die Übertragung dieser Ergebnisse und die Erweiterung um die Gefährdungsanalyse und Risikobewertung (*Kapitel 9*), basierend auf den bereits vorgestellten pathologischen Szenarien, stellen eine Neuerung dar. Auch die Verwendung des Fähigkeitengraphen basierend auf dem Fertigkeitengraph aus der Konzeptphase wird als neues Konzept vorgestellt. Das resultierende funktionale Sicherheitskonzept in *Kapitel 10* bildet den Abschluss des Teils. Es basiert auf den Fähigkeitengraphen und der damit möglichen Selbstrepräsentation des Systems. Alternative Ansätze, wie beispielsweise von Hörwick (2011), sind bisher spärlich und basieren auf fest programmierten Aktionen, die im Fehlerfall ausgeführt werden. Hier werden die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Systems nicht detailliert betrachtet. Daher stellt das in der vorliegenden Arbeit beschriebene funktionale Sicherheitskonzept eine Neuerung dar.

Wie in *Teil II* werden die vorgeschlagenen Prozessschritte exemplarisch auf das automatisierte Fahrzeug auf Abruf angewendet. Hierbei ist zu beachten, dass erneut der Ablauf der Entwicklung im Vordergrund steht. Auch in diesem Teil werden die einzelnen Schritte nicht vollständig durchgeführt und evaluiert. Jeder der Entwicklungsschritte bietet das Potential für weitere Forschungsarbeiten, um von dem aktuell verwendeten Expertenwissen zu einem methodischeren Vorgehen übergehen zu können.

8 Ziele, Anforderungen und Vorgehen

Bei der vollständig automatisierten Fahrzeugführung muss die nicht mehr mögliche Übergabe an den Menschen im Fehlerfall kompensiert werden. Das technische System muss so entwickelt sein, dass es von selbst einen sicheren Zustand erhalten kann. Während sich Fahrerassistenzsysteme selbständig deaktivieren können und dadurch die Fahraufgabe an den Menschen abgeben, ist dies bei einem vollständig automatisierten Fahrzeug keine Option, da das Fahrzeug dann nicht mehr geführt wird und außer Kontrolle gerät. Aus diesem Grund werden bei der Entwicklung eines vollständig automatisierten Fahrzeugs zusätzliche und technisch aufwendiger zu erreichende Sicherheitsanforderungen als bei Fahrerassistenzsystemen gestellt.

Bei der Betrachtung der Sicherheit im Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs wird häufig zwischen funktionaler Sicherheit und Sicherheitsfunktionen unterschieden, wie dies auch von Hörwick und Siedersberger (2010b) getan wird. Funktionale Sicherheit meint den Einsatz von Hardware und Software, die zuverlässig funktionieren soll und Fehlfunktionen verhindert. Die in *Kapitel 6* gestellten Anforderungen an ein vollständig automatisiertes Fahrzeug müssen so umgesetzt sein, dass das verbleibende Risiko für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer zumutbar ist. Um dies für Fahrerassistenzsysteme im Automobilbereich zu erreichen, werden diese nach der Norm ISO 26262 entwickelt.

Sicherheitsfunktionen sind dagegen Teile des Systems, die nicht direkt zur Funktionalität des Systems beitragen. Dazu gehören zu einem Großteil die Selbstrepräsentation, die Selbstwahrnehmung, die funktionale Degradation und die Selbstheilung. Auch ohne diese wäre die Teilnahme des vollständig automatisierten Fahrzeugs am Straßenverkehr möglich, jedoch nicht sicher. Diese Sicherheitsfunktionen müssen ebenfalls nach den Prinzipien der funktionalen Sicherheit entwickelt werden.

In diesem Kapitel werden die Ziele des funktionalen Sicherheitskonzepts, die Anforderungen an das funktionale Sicherheitskonzept und das Vorgehen zur Erstellung des funktionalen Sicherheitskonzepts herausgearbeitet. Der Fokus liegt hier auf den genannten Sicherheitsfunktionen.

8.1 Ziele des funktionalen Sicherheitskonzepts

Nach Maurer (2000, Seite 58) muss ein autonomes (hier vollständig automatisiertes Fahrzeug) zu jedem Zeitpunkt und bei jeder Entscheidung seine funktionalen Grenzen kennen. Diese Forderung hat sich durch die Erfahrungen im Projekt Stadtpilot bestätigt. Basierend auf dem eigenen Zustand als Teil der aktuellen Situation entscheidet das Fahrzeugführungssystem, welche Fahrmanöver möglich sind, welche notwendig sind und wie diese durchgeführt werden sollen. Um dies zu erreichen, müssen die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie kann ein System seine eigene Leistungsfähigkeit bewerten?
- Welche Aktionen eignen sich abhängig von der aktuellen Situation, um einen sicheren Zustand zu erhalten?

- Wie kann die Leistungsfähigkeit nach einem Ereignis, das die aktuelle Leistungsfähigkeit beeinträchtigt, verbessert werden?
- Wie kann ein Fahrzeugführungssystem funktional sicher entwickelt werden?

Die folgenden Kapitel setzen sich mit diesen Fragestellungen auseinander. Da es sich um sehr umfangreiche und teils von einer konkreten Implementierung abhängige Fragestellungen handelt, können diese nicht vollständig und allgemeingültig beantwortet werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus daher auf Konzepte gelegt, die eine Beantwortung der Fragestellungen für konkrete Systemausprägungen ermöglicht.

8.2 Anforderungen an ein funktionales Sicherheitskonzept

In diesem Kapitel werden Anforderungen an ein funktionales Sicherheitskonzept formuliert, das einen sicheren Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs ermöglichen soll. Als Grundlage wird auch hier die Norm ISO 26262 genutzt. Nach der Norm ISO 26262 beinhaltet ein funktionales Sicherheitskonzept die funktionalen Sicherheitsanforderungen mit zusätzlichen Informationen, die Beziehung von Sicherheitsanforderungen zu den funktionalen Komponenten der funktionalen Systemarchitektur und zu den Elementen der Hardware- und Softwarearchitekturen und deren Zusammenspiel zur Erreichung der Sicherheitsziele (ISO 26262, 2011, Teil 1, 1.52). In der vorliegenden Arbeit werden die Elemente der funktionalen Systemarchitektur und zusätzlich die Fertigkeiten betrachtet. Die Anwendung auf Hardware- und Softwareelemente erfolgt nicht.

Unter einer funktionalen Sicherheitsanforderung wird die Spezifikation eines Verhaltens oder einer Maßnahme zur Erhaltung beziehungsweise Erhöhung der Sicherheit verstanden (ISO 26262, 2011, Teil 1, 1.53). Diese Sicherheitsanforderungen sind für einen sicheren Betrieb notwendig. Sicherheitsanforderungen können sich direkt und indirekt auf das Verhalten des Fahrzeugs auswirken. Direkte Auswirkungen erfolgen durch Überstimmung oder Verhinderung des normalen Verhaltens nach funktionaler Spezifikation aus Sicherheitsgründen. Indirekte Auswirkungen erfolgen durch zusätzlich benötigte Rechenleistung und Speicherkapazität, Netzwerklast und Energieverbrauch. Es resultieren die folgenden Anforderungen an Sicherheitsfunktionen und -maßnahmen.

- Sicherheitsfunktionen sollen sich nicht einschränkend auf den normalen, fehlerfreien Betrieb auswirken.
- Sicherheitsfunktionen sollen keine signifikante Last für die verwendete Hardware der funktionalen Module erzeugen. Im Idealfall werden die Sicherheitsfunktionen auf separater Hardware betrieben.
- Die hohe Dynamik des städtischen Straßenverkehrs erfordert, dass Sicherheitsfunktionen zeitnah ausgeführt werden. Ein Maß dafür ist die Reaktionszeit des menschlichen Fahrers. Diese liegt im Bereich von 0,5 – 1,1 Sekunden (Johansson und Rumar, 1971). Reaktionen des automatisierten Fahrzeugs sollten in jeder Situation zumindest genauso schnell erfolgen¹.

¹Dies ist eine vereinfachende Annahme für eine offene Forschungsfrage. Eine Metrik zum Vergleich der Leistungsfähigkeit von automatisierten Fahrzeugen und menschlichen Fahrern könnte diese beantworten. Winner (2015) schlägt eine Vorgehensweise zur Formulierung solch einer Metrik vor.

- Durch Sicherheitsfunktionen muss das vollständig automatisierte Fahrzeug vollständig überwacht werden. Für einen sicheren und fehlerfreien Betrieb sind alle funktionalen Komponenten und Fertigkeiten relevant und notwendig.
- Es dürfen nur Aktionen ausgeführt werden, die zu einer Erhaltung eines sicheren Zustands beitragen, beziehungsweise die Sicherheit erhöhen.

8.3 Vorgehen zur Erstellung des funktionalen Sicherheitskonzepts

Die Erstellung eines Sicherheitskonzepts folgt nach Norm ISO 26262 nach der Erstellung der Item-Definition, der Initialisierung eines Sicherheitslebenszyklus und der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung. In *Teil II* der vorliegenden Arbeit wurde der Prozess zur Erstellung einer Item-Definition für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf beschrieben. Die Ergebnisse aus *Kapitel 6* dienen als Input für die weiteren Schritte im Entwicklungsprozess.

Der Sicherheitslebenszyklus beschreibt die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen im Hinblick auf eine funktional sichere Entwicklung des Items (ISO 26262, 2011, Teil 2). Hierfür wird zunächst analysiert, wie sich das zu entwickelnde System zusammen setzt und ob es sich um eine Neuentwicklung oder eine Weiterentwicklung handelt. Auch die Nutzung von existierenden Teilsystemen wird hier festgelegt. Wie in *Kapitel 4.2* beschrieben, wird das Fahrzeugführungssystem in der vorliegenden Arbeit als ein Item angesehen. Es wäre durchaus möglich, das System aufzuteilen und mehrere Items zu definieren, die dann für sich genommen funktional sicher entwickelt werden. Ob dies einen Vorteil oder Nachteil für die resultierende Sicherheit des automatisierten Fahrzeugs ergeben würde, kann in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden, da eine Analyse und ein Vergleich der resultierenden Spezifikation aus beiden Vorgehensweisen durchgeführt werden müsste. Im Projekt aFAS wurde dieses Thema diskutiert und dort wurde eine Trennung des Systems in mehrere Items vorgeschlagen (Stolte u. a., 2015). Es wird im Folgenden angenommen, dass es sich um eine Neuentwicklung handelt und das Gesamtsystem als ein Item angesehen wird. Daraus resultieren nach Norm ISO 26262 die Prozessschritte Gefährdungsanalyse und Risikobewertung (*Kapitel 9*) und Erstellung des funktionalen Sicherheitskonzepts (*Kapitel 10*) (ISO 26262, 2011, Teil 3).

In *Teil II* wurden bereits funktionale Anforderungen an das System gestellt. In *Kapitel 9.2* werden basierend auf gefährlichen Ereignissen, die in den pathologischen Szenarien aus *Kapitel 6.1.2* auftreten können, Sicherheitsziele formuliert. In *Kapitel 10.1* werden aus den Sicherheitszielen die Sicherheitsanforderungen abgeleitet. Da sich diese mit den funktionalen Anforderungen decken können, werden beide Arten von Anforderungen kombiniert und aus dem Resultat ein funktionales Sicherheitskonzept erstellt, das sowohl sicheres Verhalten als auch funktionale Sicherheit ermöglicht.

Abbildung 8.1 stellt das Vorgehen zur Erstellung des funktionalen Sicherheitskonzepts dar. In der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung werden Sicherheitsziele abgeleitet und formuliert. Aus diesen werden im funktionalen Sicherheitskonzept die funktionalen Sicherheitsanforderungen formuliert. Die funktionalen Anforderungen aus der Item-Definition werden mit den Sicherheitsanforderungen kombiniert. Dadurch können die Sicherheitsziele auf den resultierenden Anforderungskatalog übertragen werden. Abschließend werden die

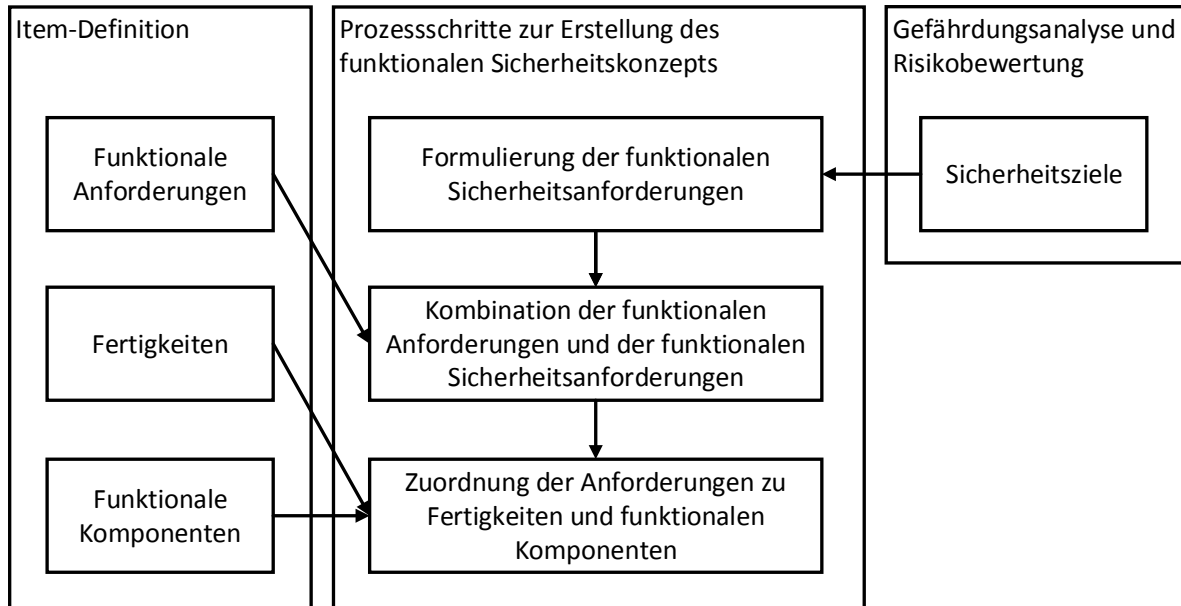


Abbildung 8.1: Schritte zur Erstellung des funktionalen Sicherheitskonzepts

Anforderungen den Fertigkeiten und den funktionalen Komponenten aus der Item-Definition zugeordnet.

9 Vereinfachte Gefährdungsanalyse und Risikobewertung für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf

In diesem Kapitel erfolgt eine vereinfachte Gefährdungsanalyse und Risikobewertung für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf. Basierend auf den pathologischen Szenarien in *Kapitel 6.1.2* werden die verschiedenen nach Norm ISO 26262 empfohlenen Schritte durchgeführt. In *Abbildung 9.1* sind diese abgebildet. Durch die erneute Betrachtung der pathologischen Szenarien sollen potenziell gefährliche Situationen identifiziert und beschrieben werden.

Das Vorgehen in diesem Kapitel folgt dem vorgeschlagenen Vorgehen in der Norm ISO 26262, jedoch mit einer Beschränkung auf die pathologischen Szenarien. Es wird demnach keine neue Methodik vorgeschlagen, sondern eine bisher noch nicht in der Literatur vorhandene Fokussierung auf pathologische Szenarien durchgeführt.

Obwohl bei der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung nach Norm ISO 26262 nur die Personenschäden untersucht werden, müssten hier auch Sachschäden und Verstöße gegen geltendes Recht mitgedacht werden. Dies ist sinnvoll, da beispielsweise Kollisionen mit Hindernissen und gesetzeswidriges Verhalten andere Verkehrsteilnehmer irritieren können und dadurch sicherheitsrelevant werden. Eine Kollision muss daher nicht zwingend einen Personenschaden verursachen, um relevant zu sein.

Die identifizierten gefährlichen Ereignisse werden anhand der empfohlenen Vorgehensweise nach Norm ISO 26262 klassifiziert. Dies beinhaltet die Festlegung, wie häufig (Auftrittswahrscheinlichkeit) ein gefährliches Ereignis auftritt, wie hoch der Schaden ist (Folgeschwere) und wie beherrschbar das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs für die weiteren Verkehrsteilnehmer ist (Beherrschbarkeit). Im Vergleich zu Fahrerassistenzsystemen entfällt bei vollständig automatisierten Fahrzeugen die Beherrschbarkeit einer Situation durch den Fahrer, da dieser nicht in die Fahrzeugführung eingreifen muss und gegebenenfalls nicht kann. Die Beherrschbarkeit, die im Folgenden genannt wird, bezieht sich daher auf die weiteren Verkehrsteilnehmer. Diese sind durchaus in der Lage, Fehler und Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer und somit auch automatisierter Fahrzeuge zu kompensieren.

Als Resultat der Klassifikation der gefährlichen Ereignisse werden Automobil-Sicherheitsintegritätslevel (ASIL) benannt, um die zur Absicherung erforderlichen Maßnahmen abzuleiten.

Der finale Schritt ist die Ableitung von Sicherheitszielen, die durch das funktionale Sicherheitskonzept erfüllt werden müssen.

9.1 Analyse von Szenarien und Identifikation von Gefährdungen

Als Ausgangspunkt für die Betrachtung von Szenarien dienen die pathologischen Szenarien aus *Kapitel 6.1.2*. Im Folgenden werden für jedes Szenario mögliche Verhaltensweisen des

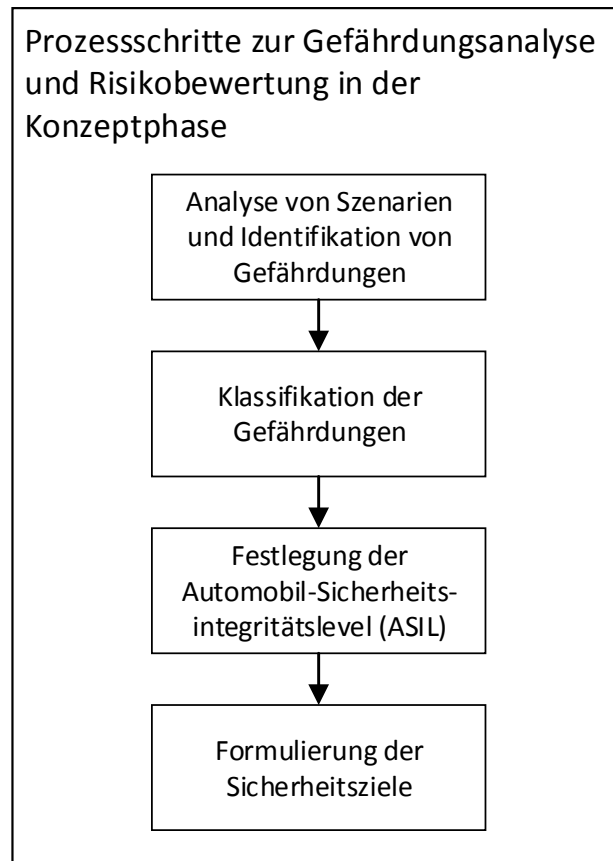


Abbildung 9.1: Prozessschritte zur Erstellung der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung

vollständig automatisierten Fahrzeugs beschrieben, die zu einem gefährlichen Ereignis¹ führen können. Wenn bereits detailliertes Wissen über die Implementierung des zu entwickelnden Systems vorhanden ist, können an dieser Stelle Fehlfunktionen der Komponenten mit berücksichtigt werden, die zu den gefährlichen Ereignissen führen können. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Schritt übersprungen, da es noch keine Informationen über die Implementierung des Systems gibt. Der Vorteil davon ist eine von der Implementierung vollkommen unabhängige Betrachtung der gefährlichen Ereignisse. Ein Nachteil ist die dadurch hier nicht mögliche Benennung der Hardware- und Softwarekomponenten, die ein gefährliches Ereignis auslösen können.

Im Folgenden werden die pathologischen Szenarien analysiert, um die möglichen Gefährdungen in den Szenarien zu identifizieren. Hierfür werden sowohl Gefährdungen für die Passagiere des automatisierten Fahrzeugs als auch für die weiteren Verkehrsteilnehmer betrachtet. Die Analyse basiert auf Expertenwissen. Ein systematisches Vorgehen für diesen Schritt ist derzeit Forschungsgegenstand.

¹Übersetzt aus dem Englischen: *Hazardous events* (ISO 26262, 2011, Teil 1, 1.59)

Reifenteil auf einem Fahrstreifen (*Kapitel 6.1.2.1*)

In diesem Fall sind die folgenden Reaktionen des vollständig automatisierten Fahrzeugs möglich:

1. Fahrzeug reagiert mit Bremsung in den Stillstand: Eine Kollision mit dem Reifenteil kann vermieden werden. Es ist denkbar, dass der rückwärtige Verkehr nicht rechtzeitig reagieren kann und es daher zu einer Kollision kommt.
2. Fahrzeug reagiert mit Ausweichmanöver: Eine Kollision mit dem Reifenteil kann vermieden werden. Es ist denkbar, dass weitere Verkehrsteilnehmer durch das Ausweichmanöver irritiert werden.
3. Fahrzeug reagiert nicht auf Reifenteil: Es findet eine Kollision mit dem Reifenteil statt. Dies kann zu Beschädigungen führen, die wiederum zu einer Gefährdung für Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer führen kann, da das Fahrzeug möglicherweise nicht mehr kontrollierbar ist.
4. Fahrzeug reagiert zu spät auf Reifenteil: Es findet eine Kollision statt, da das Fahrzeug diese weder durch Ausweichen noch durch Abbremsen verhindern kann. Aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit durch das Abbremsen können die Unfallfolgen reduziert werden. Beim Ausweichen kann es dennoch zu einer Kollision mit dem Reifenteil kommen, wodurch Schäden am Fahrzeug entstehen können. Dadurch kann der rückwärtige Verkehr ebenfalls gefährdet werden.

Widersprüchliche Tempolimits im Bereich von Arbeitsstellen (*Kapitel 6.1.2.2*)

1. Fahrzeug fährt mit zu hoher Geschwindigkeit: Das Fahrzeug fährt mit zu hoher Geschwindigkeit an der Arbeitsstelle vorbei, wodurch Arbeiter gefährdet werden können oder zu spät auf Verschmutzung und Einschränkung des Fahrstreifens reagiert werden kann.
2. Fahrzeug fährt auch nach der Arbeitsstelle mit geringer Geschwindigkeit: Andere Verkehrsteilnehmer können irritiert werden.

Bildung einer Rettungsgasse oder eines Rettungswegs (*Kapitel 6.1.2.3*)

1. Fahrzeug blockiert Rettungsfahrzeug: Ein Rettungseinsatz wird erschwert.
2. Fahrzeug blockiert weitere Verkehrsteilnehmer: Ein Rettungseinsatz wird erschwert, da die weiteren Verkehrsteilnehmer keinen Rettungsweg öffnen können.

Wildwechsel/Tiere auf der Straße (*Kapitel 6.1.2.4*)

Hier gelten dieselben vier Fälle wie für ein Reifenteil auf einem Fahrstreifen. Auf eine erneute Auflistung wird daher verzichtet

Überholen eines Radfahrers (*Kapitel 6.1.2.5*)

1. Fahrzeug überholt trotz Gegenverkehr: Es kommt zu einer Gefährdung der Insassen, des Gegenverkehrs und des Radfahrers.
2. Fahrzeug überholt mit zu geringem Abstand: Es kommt zu einer Gefährdung des Radfahrers.

Plötzlich vor das Fahrzeug tretender Fußgänger (*Kapitel 6.1.2.6*)

Hier gelten dieselben vier Fälle wie für ein Reifenteil oder ein Tier auf einem Fahrstreifen. Die Konsequenzen im Sinne von Personenschäden können jedoch höher sein.

Person, die den Verkehr leitet (*Kapitel 6.1.2.7*)

1. Fahrzeug reagiert nicht: Das Fahrzeug missachtet die aktuell geltenden Vorfahrtsregeln, wodurch es zu einer Kollision kommen kann.
2. Fahrzeug reagiert zu spät: Das Fahrzeug reagiert zu spät auf die Anweisungen der Person, wodurch die aktuell geltenden Vorfahrtsregeln missachtet werden und es zu einer Kollision kommen kann.
3. Fahrzeug reagiert falsch: Das Fahrzeug interpretiert die aktuell geltenden Vorfahrtsregeln falsch, wodurch es zu einer Kollision kommen kann.

Unfallflucht (*Kapitel 6.1.2.8*)

1. Fahrzeug reagiert nicht: Das Fahrzeug reagiert nicht auf eine Kollision, wodurch es mit Beschädigungen weiter fährt und möglicherweise in zukünftigen Situationen nicht mehr sicher reagieren kann.

9.2 Klassifikation der Gefährdungen und Festlegung der Automobil-Sicherheitsintegritätslevel (ASIL)

In diesem Schritt werden die Verhaltensweisen des automatisierten Fahrzeugs hinsichtlich der Folgeschwere, Auftretenswahrscheinlichkeit und Beherrschbarkeit analysiert und eine ASIL-Einstufung nach ISO 26262 (2011, Teil 3) wird vorgenommen. Das Vorgehen aus der Norm ISO 26262 wird in diesem Kapitel übernommen und nicht verändert, da die Klassifikation mittels ASIL auch den Anforderungen von automatisierten Fahrzeugen genügt. Die Klassen für die Folgeschwere, Auftretenswahrscheinlichkeit und Beherrschbarkeit sind aus der Norm ISO 26262 übernommen. Auch das Vorgehen ist aus der Norm ISO 26262 übernommen und basiert auf Expertenwissen.

Die Folgeschwere wird in die folgenden Klassen eingeteilt:

- S0: Keine Verletzungen (weniger als 10 % nach AIS² 1-6)
- S1: Leichte und mittlere Verletzungen (mehr als 10 % nach AIS 1-6)
- S2: Ernste und lebensbedrohliche Verletzungen (mehr als 10 % nach AIS 3-6)
- S3: Lebensbedrohliche und tödliche Verletzungen (mehr als 10 % nach AIS 5-6)

Die Auftretenswahrscheinlichkeit wird in die folgenden Klassen eingeteilt:

- E1: Sehr geringe Wahrscheinlichkeit (nicht quantifiziert, weniger als einmal jährlich)

²AIS steht im Englischen für Abbreviated Injury Scale (Deutsche Übersetzung: Abgekürzte Skala für Verletzungen)

Folgeschwere	Aufretenswahr- scheinlichkeit	Beherrschbarkeit		
		C 1	C 2	C 3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

Tabelle 9.1: „ASIL determination“ (Festlegung der ASIL) aus ISO 26262 (2011, Teil 3); QM steht für Qualitätsmanagement; S0 und C0 werden nicht betrachtet, da in diesen Fällen keine Gefährdung auftritt.

- E2: Geringe Wahrscheinlichkeit (Weniger als 1 % der Betriebszeit, einige Male im Jahr)
- E3: Mittlere Wahrscheinlichkeit (Von 1 % bis 10 % der Betriebszeit, einmal monatlich)
- E4: Hohe Wahrscheinlichkeit (Mehr als 10 % der Betriebszeit, bei fast jeder Fahrt)

Die Beherrschbarkeit wird in die folgenden Klassen eingeteilt:

- C0: Im Allgemeinen beherrschbar
- C1: Einfach beherrschbar (99 % aller Fahrer)
- C2: Normalerweise beherrschbar (90 % aller Fahrer)
- C3: Schwer beherrschbar (Weniger als 90 % aller Fahrer)

Tabelle 9.1 zeigt die allgemeine Zuordnung der ASIL aus der Norm ISO 26262 (ISO 26262, 2011, Teil 3).

In *Tabelle 9.2* sind die identifizierten gefährlichen Ereignisse und die zugeordneten Klassen von Folgeschwere, Auftretenswahrscheinlichkeit und Beherrschbarkeit aufgelistet. Zusätzlich sind die ASIL-Einstufungen enthalten. Die eingetragenen Werte basieren auf den Erfahrungen aus dem Projekt Stadtpilot und den Diskussionen aus dem Projekt aFAS mit Gerrit Bagschik und Torben Stolte.

Die pathologischen Szenarien führen zu einer hohen Folgeschwere (S2 und S3), treten mit unterschiedlicher Häufigkeit auf (E1, E2, E3 und E4) und sind in vielen Fällen

Fall	Gefährliches Ereignis	Folgen- schwere	Auftre- tens- wahr- schein- lichkeit	Be- herrsch- barkeit	ASIL
Reifen teil	Fahrzeug reagiert mit Bremsung in den Stillstand	S2	E2	C2	QM
Reifen teil	Fahrzeug reagiert mit Ausweichmanöver	S2	E2	C2	QM
Reifen teil	Fahrzeug reagiert nicht	S3	E2	C3	B
Reifen teil	Fahrzeug reagiert zu spät	S2	E2	C3	A
Tempolimit	Fahrzeug fährt mit zu hoher Geschwindigkeit	S3	E2	C2	A
Tempolimit	Fahrzeug fährt auch nach der Arbeitsstelle mit geringer Geschwindigkeit	S2	E2	C1	QM
Rettungsweg	Fahrzeug blockiert Rettungsfahrzeug	S3	E3	C2	B
Rettungsweg	Fahrzeug blockiert weitere Verkehrsteilnehmer	S3	E3	C3	C
Wildwechsel/Tier	Fahrzeug reagiert mit Bremsung in den Stillstand	S2	E2	C2	QM
Wildwechsel/Tier	Fahrzeug reagiert mit Ausweichmanöver	S2	E2	C2	QM
Wildwechsel/Tier	Fahrzeug reagiert nicht	S3	E2	C3	B
Wildwechsel/Tier	Fahrzeug reagiert zu spät	S2	E2	C3	A
Radfahrer	Fahrzeug überholt trotz Gegenverkehr	S3	E4	C3	D
Radfahrer	Fahrzeug überholt mit zu geringem Abstand	S3	E4	C2	C
Fußgänger	Fahrzeug reagiert mit Bremsung in den Stillstand	S3	E4	C2	C
Fußgänger	Fahrzeug reagiert mit Ausweichmanöver	S3	E4	C2	C
Fußgänger	Fahrzeug reagiert nicht	S3	E4	C3	D
Fußgänger	Fahrzeug reagiert zu spät	S3	E4	C3	D
Person, die den Verkehr leitet	Fahrzeug reagiert nicht	S3	E1	C3	A
Person, die den Verkehr leitet	Fahrzeug reagiert zu spät	S3	E1	C3	A
Person, die den Verkehr leitet	Fahrzeug reagiert falsch	S3	E1	C3	A
Unfallflucht	Fahrzeug reagiert nicht	S3	E1	C2	QM

Tabelle 9.2: Bewertung der gefährlichen Ereignisse für die pathologischen Szenarien

für die weiteren Verkehrsteilnehmer nur schwer beherrschbar (C3). Die unterschiedlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten sind dem seltenen Auftreten von pathologischen Szenarien geschuldet.

In allen Szenarien ist das vollständig automatisierte Fahrzeug auf die Reaktion der weiteren Verkehrsteilnehmer angewiesen. Hier stellt sich die Frage, wie viel Kooperation von den weiteren Verkehrsteilnehmern erwartet werden kann und wie sich dies auf die Akzeptanz von automatisierten Fahrzeugen auswirkt. Würde man annehmen, dass das vollständig automatisierte Fahrzeug ohne das kooperative Verhalten der weiteren Verkehrsteilnehmer auskommen muss, so würde für die Beherrschbarkeit grundsätzlich ein C3 angenommen werden. Dadurch würde sich die ASIL-Einstufung bei zahlreichen Fällen erhöhen, wodurch alle Fälle bis auf das langsame Fahren nach einer Arbeitsstelle mindestens mit ASIL A bewertet wären.

9.3 Formulierung der Sicherheitsziele

Die Sicherheitsziele sind das Ergebnis der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung und dienen als Eingangsinformation für die Erstellung des funktionalen Sicherheitskonzepts. Im Folgenden wird nur der Fall des plötzlich auf die Fahrbahn tretenden Fußgängers betrachtet. Die Betrachtung aller relevanten Fälle kann in der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden, da hierfür zunächst alle Szenarien beschrieben werden müssen, dann alle Gefährdungen abgeleitet werden müssen und diese dann bewertet werden müssen. Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Vorgehen eignet sich jedoch dafür.

Der Fall des auf die Fahrbahn tretenden Fußgängers wird gewählt, da er schwerwiegende Konsequenzen hat und zusätzlich bei jeder Fahrt auftreten kann. Er kombiniert daher die Eigenschaften von normalen Szenarien und den pathologischen Szenarien, da er häufig genug auftreten kann, um mit einem ASIL D bewertet zu werden. Für diesen Fall resultiert daher das folgende ASIL D Sicherheitsziel:

Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss bei einem plötzlich auf die Fahrbahn tretenden Fußgänger mit einer für die weiteren Verkehrsteilnehmer beherrschbaren Verzögerung abbremsen oder ausweichen, sodass es dem Fußgänger keinen Schaden zufügt und keine weiteren Verkehrsteilnehmer gefährdet.

Dieses Sicherheitsziel wird in den folgenden Kapiteln als Grundlage verwendet. Es sei darauf hingewiesen, dass auch konstruktive Maßnahmen am automatisierten Fahrzeug, wie zum Beispiel eine spezielle Form der Fahrzeugfront oder ein spezielles absorbierendes Material zu einer Reduzierung der Unfallfolgen verwendet werden könnten. Dies wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht betrachtet, da das sichere Verhalten des Fahrzeugs im Fokus steht.

Eine Betrachtung weiterer Sicherheitsziele würde keine Beiträge zum Stand der Forschung liefern. Das Vorgehen und das resultierende Sicherheitskonzept für das betrachtete Sicherheitsziel lassen sich auf weitere Sicherheitsziele übertragen.

10 Resultierendes funktionales Sicherheitskonzept¹

Das funktionale Sicherheitskonzept für ein Fahrzeugführungssystem für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf beinhaltet mehrere Teile. Zunächst werden aus den Sicherheitszielen die funktionalen Sicherheitsanforderungen abgeleitet. Dies erfolgt analog zur Norm ISO 26262. Sicherheitsanforderungen werden mit den funktionalen Anforderungen abgeglichen und danach den Fertigkeiten und den funktionalen Komponenten zugeordnet. Dieser Schritt stellt eine Neuerung im Vergleich zum Vorgehen nach Norm ISO 26262 dar, da der Fertigkeitengraph bisher nicht Teil der Konzeptphase nach Norm ISO 26262 ist. Aufgrund der Verfügbarkeit des Fertigkeitengraphen und der funktionalen Systemarchitektur aus der Konzeptphase können die ASIL nicht nur auf Hardware- oder Softwarekomponenten, sondern bereits auf Fertigkeiten und funktionale Blöcke übertragen werden. Aufgrund der Überschneidung von funktionalen Anforderungen und Sicherheitsanforderungen lassen sich die ASIL auch auf funktionale Anforderungen anwenden. Hieraus lassen sich die ermittelten ASIL auf diese abbilden.

Die vorliegende Arbeit endet mit dem funktionalen Sicherheitskonzept. In der üblicherweise nachfolgenden Entwicklung des technischen Sicherheitskonzepts werden die ASIL auf die zu entwickelnden Hardware- und Softwarekomponenten weitergereicht. Dies ist jedoch nicht mehr Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Das hier beschriebene Vorgehen und das funktionale Sicherheitskonzept sind zwar an den Prozess der Norm ISO 26262 angelehnt, jedoch wird das funktionale Sicherheitskonzept nach Norm ISO 26262 fallweise betrachtet. Dies bedeutet, dass nach Norm ISO 26262 für jedes Sicherheitsziel eine Strategie erstellt wird, wie das Sicherheitsziel erreicht werden kann. Hierfür werden die betroffenen Komponenten benannt, und es werden Sicherheitsanforderungen an diese aus der Strategie abgeleitet.

In der vorliegenden Arbeit wird das funktionale Sicherheitskonzept allgemeiner formuliert und ein generischer Ansatz für automatisierte Fahrzeuge beschrieben. Dies ist sinnvoll, da sich nach einer Analyse jedes beschreibbaren Szenarios mit jeder Ausprägung der Entwicklung des Szenarios und einer darauf folgenden Gefährdungsanalyse und Risikobewertung zahlreiche Sicherheitsanforderungen ergeben, die einen, die Sicherheitsziele und Sicherheitsanforderungen, übergreifenden Ansatz erfordern. Ein Nachweis, dass dies so ist, kann nicht geleistet werden, da in der vorliegenden Arbeit und vermutlich auch darüber hinaus nicht alle Szenarien für das vollständig automatisierte Fahrzeug beschrieben und analysiert werden können. Im Projekt aFAS hat sich bereits bei einem deutlich kleineren Anwendungsfall eine Tendenz in diese Richtung gezeigt (Bagschik u. a., 2016). Ein Vorteil der Erstellung eines generalisierten funktionalen Sicherheitskonzepts ist die Anwendbarkeit auf unterschiedliche Automatisierungsgrade und Fahrfunktionen, die als Teil des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf angesehen werden können. Wichtige Voraussetzung für diesen Ansatz

¹Die Inhalte dieses Kapitels wurden in zahlreichen Diskussionen mit Marcus Nolte, Gerrit Bagschik, Richard Matthaei und Simon Ulbrich geschärft und sind immer noch Forschungsgegenstand in den Projekten Controlling Concurrent Change (CCC, siehe <http://ccc-project.org/>, abgerufen am 23.03.2016), aFAS und Stadtpilot.

ist die Erstellung des Fertigkeitengraphen in der Item-Definition (*Kapitel 6.5*). Dieser wird als Grundlage für das funktionale Sicherheitskonzept und dem darin enthaltenen Fähigkeitengraph genutzt. In *Kapitel 10.3* wird ein Überblick über die Elemente des Sicherheitskonzepts gegeben.

10.1 Ableitung der Sicherheitsanforderungen

Aus dem in *Kapitel 9.3* formulierten Sicherheitsziel lassen sich die folgenden funktionalen Sicherheitsanforderungen ableiten.

Damit das vollständig automatisierte Fahrzeug auf den Fußgänger reagieren kann, muss es diesen wahrnehmen. Die resultierende ASIL D-Sicherheitsanforderung lautet:

SA01	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss für die Fahrentscheidung relevante Fußgänger wahrnehmen.
------	---

Außerdem muss es erkennen, welche Bereiche des Umfelds es nicht wahrnehmen kann, zum Beispiel durch Verdeckungen oder außerhalb der Sensorreichweite, da von dort plötzlich in den Fahrweg tretende oder fahrende Hindernisse auftreten können. Die resultierende ASIL D-Sicherheitsanforderung lautet:

SA02	Das vollständig automatisierte Fahrzeug muss verdeckte Bereiche wahrnehmen aus denen Fußgänger hervortreten können, und diese bei der Fahrentscheidung berücksichtigen.
------	---

Entweder hat das vollständig automatisierte Fahrzeug dadurch den Fußgänger bereits wahrgenommen oder nimmt an, dass aus einem verdeckten Bereich ein Fußgänger heraustreten kann. Damit das Fahrzeug abbremsen oder ausweichen kann, muss es rechtzeitig reagieren und somit auch den Fußgänger oder den verdeckten Bereich rechtzeitig wahrnehmen. Hier ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der eigenen Fahrgeschwindigkeit, der erreichbaren Verzögerung und der Entfernung zum Fußgänger oder verdeckten Bereich. Die resultierenden ASIL D-Sicherheitsanforderungen lauten:

SA03	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass es auf einen wahrgenommenen Fußgänger sicher reagieren kann, ohne diesen und weitere Verkehrsteilnehmer zu gefährden.
SA04	Das vollständig automatisierte Fahrzeug darf nur so schnell fahren, dass es auf einen aus einem verdeckten Bereich tretenden Fußgänger sicher reagieren kann, ohne diesen und weitere Verkehrsteilnehmer zu gefährden.

Sicher reagieren heißt, so abzubremsen oder so auszuweichen, dass der Fußgänger nicht erfasst wird und die weiteren Verkehrsteilnehmer die Situation beherrschen.

10.2 Zuordnung der funktionalen Sicherheitsanforderungen zu Fertigkeiten und funktionalen Komponenten

Die vier identifizierten Sicherheitsanforderungen aus dem vorherigen Kapitel werden im Folgenden mit den bereits erstellten funktionalen Anforderungen aus *Tabelle 6.6* abgeglichen. Zusätzlich werden die resultierenden Anforderungen den Fertigkeiten aus dem Fertigkeitengraph in *Abbildung 6.16* und den funktionalen Komponenten der funktionalen Systemarchitektur aus *Abbildung 6.17* zugeordnet.

Die resultierenden Sicherheitsanforderungen sind in *Tabelle 10.1* aufgelistet. Die Auswahl der Anforderungen erfolgt mit dem Ziel der Formulierung von generalisierten Aussagen für das vollständig automatisierte Fahrzeug, dessen Fertigkeiten und der funktionalen Komponenten der funktionalen Systemarchitektur.

Alle Anforderungen aus *Tabelle 10.1* müssen nach ASIL D entwickelt werden. Daraus resultieren für die Umfeldwahrnehmung, die Planung von Fahrentscheidungen und die Umsetzung der Fahrentscheidungen sehr hohe Anforderungen.

Die erforderlichen Fertigkeiten decken einen Großteil des Fertigkeitengraphen aus *Abbildung 6.16* ab. Das sichere Durchfahren des Szenarios des plötzlich auf die Fahrbahn tretenden Fußgängers benötigt somit zahlreiche Fertigkeiten, die das Sicherheitsziel erfüllen müssen. Diese Fertigkeiten erben das ASIL D von diesem Fall. Da es sich dabei um für die Fahrzeugführung generell erforderliche Fertigkeiten handelt, erben auch zahlreiche funktionale Komponenten aus *Abbildung 6.17* das ASIL D. Die Erfüllung nur eines Sicherheitsziels resultiert daher in einer erforderlichen ASIL D Absicherung für zahlreiche funktionale Anforderungen.

10.3 Überblick über das funktionale Sicherheitskonzept

In diesem Kapitel wird das resultierende funktionale Sicherheitskonzept für den Betrieb des vollständig automatisierten Fahrzeugs auf Abruf im öffentlichen Straßenverkehr ohne menschliche Eingriffsmöglichkeit vorgestellt. Die Elemente des Konzepts sind durch die bereits beschriebenen funktionalen Anforderungen und Sicherheitsanforderungen motiviert.

Aufgrund der komplexen Umgebung und den zahlreichen Komponenten des Fahrzeugführungssystems muss dieses entsprechend sorgfältig geplant, entwickelt und getestet werden, bevor ein Einsatz im Straßenverkehr erfolgen kann und darf. Die Ermittlung der aktuellen Fähigkeiten des automatisierten Fahrzeugs muss besonders beachtet werden. Das Fahrzeugführungssystem muss einerseits den Zustand der Subsysteme, Komponenten, Sensoren und Aktoren kennen und andererseits ermitteln, welche Fähigkeiten abhängig von diesen Zuständen noch sicher genutzt werden können. Hierzu müssen Fehler und Fehlzustände richtig erkannt werden. Dies erfolgt in der Kombination der Informationen aus der Selbstwahrnehmung für das Fahrzeug und für alle Komponenten des Fahrzeugführungssystems in der Selbstrepräsentation.

Die Selbstrepräsentation wird zur Realisierung sicheren Verhaltens bei den Fahrentscheidungen und zur Selbstheilung berücksichtigt. In *Abbildung 10.1* sind die Elemente des Sicherheitskonzepts dargestellt. Die funktionale Systemarchitektur und der Fertigkeitengraph werden genutzt, um einen Fähigkeitengraph zu erstellen (*Kapitel 10.5*). Als Ausgangspunkt

Sicherheitsanforderung	Funktionale Anforderungen aus <i>Tabelle 6.6</i>	Fertigkeiten aus <i>Abbildung 6.16</i>	Funktionale Komponenten aus <i>Abbildung 6.17</i>
SA01	A02.*.*	Bewegliche Elemente wahrnehmen, Fahrstreifenverlauf wahrnehmen, Zielelement auswählen	Umfeldsensorik, Fahrzeugsensorik, Merkmalsextraktion und modellbasiertes Filtern, Kontextmodellierung
SA02	A02.*.*	Szenerie wahrnehmen, Fahrstreifenverlauf wahrnehmen	Umfeldsensorik, Fahrzeugsensorik, Merkmalsextraktion und modellbasiertes Filtern, Kontextmodellierung
SA03	A03.*	Bewegliche Elemente wahrnehmen, Fahrstreifenverlauf wahrnehmen, Zielelement auswählen, Verkehrsteilnehmer folgen, Fahrzeugdynamik regeln, Abfahren der letzten geplanten Bahn, Nothalt	Siehe Umfeldsensorik, Fahrzeugsensorik, Merkmalsextraktion und modellbasiertes Filtern, Kontextmodellierung, Führung, Stabilisierung, Aktorik
SA04	A03.*	Szenerie wahrnehmen, Fahrstreifenverlauf wahrnehmen, Zielelement auswählen, Verkehrsteilnehmer folgen, Fahrzeugdynamik regeln, Abfahren der letzten geplanten Bahn, Nothalt	Umfeldsensorik, Fahrzeugsensorik, Merkmalsextraktion und modellbasiertes Filtern, Kontextmodellierung, Führung, Stabilisierung, Aktorik

Tabelle 10.1: Sicherheitsanforderungen, funktionale Anforderungen, Fertigkeiten und funktionale Komponenten; Die Platzhalter (*) bei den funktionalen Anforderungen stehen für alle untergeordneten Anforderungen aus *Tabelle 6.6*.

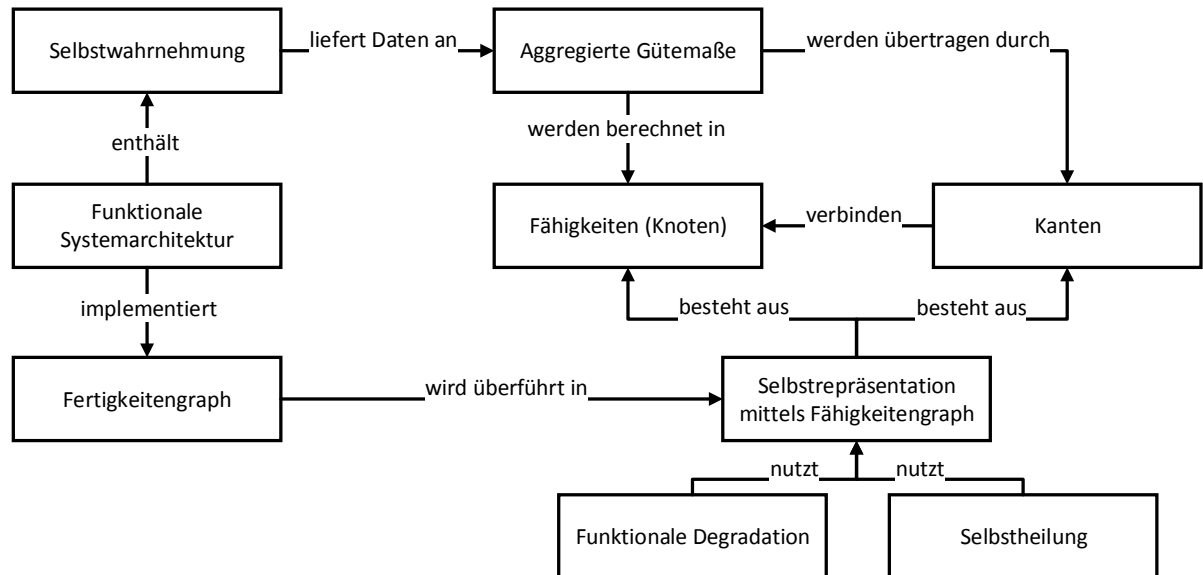


Abbildung 10.1: Elemente des funktionalen Sicherheitskonzepts; das zu entwickelnde System wird durch die funktionale Systemarchitektur repräsentiert; diese enthält die Schnittstellen zur Umwelt

dienen der Fertigkeitsgraph aus *Abbildung 6.16* und die darin enthaltenen Fertigkeiten. Diese werden im ersten Schritt identisch in Fähigkeiten überführt.

Der Fähigkeitsgraph besteht ebenfalls aus Knoten und Kanten. In den Knoten werden jeweils (aggregierte) Gütemaße (*Kapitel 10.5.3*) berechnet, die auf den Informationen der Selbstwahrnehmung (*Kapitel 10.4*) basieren. Die Kanten verbinden die Knoten wie bereits im Fertigkeitsgraph und zeigen den Informationsfluss zwischen den Fähigkeitsknoten. Der resultierende Fähigkeitsgraph ist die Selbstrepräsentation des automatisierten Fahrzeugs und wird für die Realisierung sicheren Verhaltens (*Kapitel 10.6*) mittels funktionaler Degradation (*Kapitel 10.6*) und für die Selbstheilung (*Kapitel 10.6.3*) genutzt.

10.4 Selbstwahrnehmung

Das Ziel der Selbstrepräsentation ist es, die aktuelle Leistungsfähigkeit des Systems zu ermitteln. Der erste Schritt ist die Erfassung zahlreicher verfügbarer Messwerte in der Selbstwahrnehmung. Diese ist umfangreicher als bei manuell gefahrenen Fahrzeugen, da auch die zusätzlichen Komponenten des Fahrzeugführungssystems diagnostiziert werden. Das Sicherheitssystem muss den Zustand aller Systemteile kennen. Dazu gehören die vollständige Überwachung aller Hardware- und Softwarekomponenten des Fahrzeugführungssystems sowie der elektrischen, mechanischen und hydraulischen Komponenten des Fahrzeugs. Die Selbstrepräsentation muss in der Lage sein, ein vollständiges Abbild des Systems basierend auf den Daten der Selbstwahrnehmung zu erstellen. Von Maurer (2000) wird die Fähigkeit zur Überwachung der Leistungsfähigkeit als ein Faktor für das situationsgerechte Handeln eines autonomen (automatisierten) Fahrzeugs angesehen.

„Die Überwachung der eigenen Fähigkeiten stellt für automatische Fahrzeuge die Grundlage von situationsgerechtem Handeln dar.“

(Maurer, 2000, Seite 101)

Dies wird in der vorliegenden Arbeit übernommen, da ein sicherer Betrieb nur dann möglich ist, wenn getroffene Fahrentscheidungen sicher ausführbar sind. Ohne die Überwachung der eigenen Fähigkeiten ist dies nicht möglich. Das Fahrzeug könnte sich selbst überschätzen und dadurch einen unsicheren Zustand erreichen.

Damit ein Messwert in der Selbstwahrnehmung genutzt werden kann, muss dieser verlässlich sein. Es kann besser sein, einen Wert zu verwerfen, als einen fehlerhaften Messwert zu verwenden. Diese *qualifizierten Sensorsignale* stellen hohe Anforderungen an die Entwicklung der Sensorelektronik und -software. Jeder Sensor muss erkennen, ob er korrekt funktioniert und gleichzeitig muss er zuverlässig genug sein, damit er in einem sicherheitsrelevanten System eingesetzt werden kann. Daraus folgt, dass jeder Sensor über eine eigene Diagnosefunktion verfügen muss, die neben den eigentlichen Sensordaten auch eine Abschätzung über deren Verlässlichkeit und den Zustand des Sensors liefert. Gotzig und Geduld (2015, Kapitel 18.3.3) nennen beispielsweise eine Sichtweitenmessung und eine Verschmutzungserkennung als Zusatzfunktionen, die als Eingangsdaten zur Berechnung von Gütemaßen für Umfeldsensoren genutzt werden können. Dies wird auch von Hörwick und Siedersberger (2010b) für die Komponenten von Fahrerassistenzsystemen gefordert.

Neben den Sensorinformationen ist zusätzlich ein Abgleich der tatsächlich ausgeführten zu den geplanten Aktionen des Fahrzeugs sinnvoll. Dieser hat jedoch einen retrospektiven Charakter und eignet sich daher nur als Ergänzung. Wird ein Manöver geplant, so muss die aktuelle Leistungsfähigkeit bereits in der Planung berücksichtigt werden. Nach Maurer (2000, Kapitel 5.3.2) müssen Gütemaße, die außerhalb eines gültigen Bereichs liegen, zu einem vordefinierten sicheren Zustand führen. Dieses Vorgehen ist als zusätzlicher Mechanismus sinnvoll.

Siedersberger (2003, Kapitel 6.1.4.1) fordert die Überwachung aller Bedingungen, die zur Ausführung einer Fähigkeit erforderlich sind. Dies entspricht dem hier vorgestellten Vorgehen. Hierfür sieht Siedersberger (2003, Kapitel 6.1.4.2) eine Überwachung der Zustandsgrößen einer Fähigkeit als zwar möglich aber nicht ausreichend an. Siedersberger (2003, Seite 89f.) fordert daher eine überwachende Kontrollinstanz, die Zustandsgrößen der Tätigkeiten mit einem Toleranzband abgleicht und basierend darauf korrigierend eingreift. Pellkofer (2003, Kapitel 3.3.4) fordert dies ebenfalls und nennt die Gütemaße *Fortschrittsmaße für Aktionen*.

Nach Ansicht von Siedersberger (2003, Seite 89f.) muss es zusätzlich eine situationsbezogene Überwachung der Fähigkeiten durch eine zentrale Kontrolleinheit geben. Diese muss in der Lage sein, die für eine Fähigkeit erforderlichen Rahmenbedingungen zur Ausführung der Fähigkeit, zu überwachen.

Neben den Komponenten des Fahrzeugführungssystems muss auch das Fahrzeug vollständig überwacht werden. Normalerweise würde ein Fahrer die Kontrollleuchten im Bordinstrument prüfen, um Fehler zu erkennen. Dies muss bei einem automatisierten Fahrzeug vom Fahrzeugführungssystem selbständig erledigt werden (siehe *Kapitel 1.1.2*).

In der Selbstwahrnehmung werden Informationen aus den folgenden Kategorien erhoben:

- *Fahrzeugtechnische Informationen* - Einzuordnen sind hier alle Informationen des Fahrzeugs, die keine primäre fahrdynamische Relevanz haben. Diese sind zum Beispiel die Temperatur des Kühlwassers, der Inhalt des Waschwassertanks oder die Spannung der Batterie.
- *Fahrdynamische Informationen* - Sie bilden die Dynamik des Fahrzeugs ab und können genutzt werden, um die Stabilität des Fahrzeugs zu beurteilen. Dazu gehören bei-

spielsweise Fahrzeuggeschwindigkeit, Lenkwinkel, Gasanforderung, Bremsanforderung, Außentemperatur und Regenmenge.

- *Fahrzeug-Sicherheitsinformationen* - Diese umfassen alle Messwerte, die direkt zum Schutz der Passagiere und der anderen Verkehrsteilnehmer dienen, wie zum Beispiel der Zustand der Türen und Gurtschlösser, Funktionsfähigkeit der Airbags oder die Fahrzeug-Beleuchtung.
- *Wahrnehmungsinformationen* - Zu diesen gehören alle Messwerte der Umfeldwahrnehmung und der Lokalisierung, wie zum Beispiel der Sichtbereich einzelner Sensoren.
- *Hardwareinformationen* - Diese sind beispielsweise die Auslastung der Hardware und der IT-Infrastruktur und der Zustand der Hardware des Fahrzeugführungssystems.
- *Softwareinformationen* - Zu diesen zählen alle Messwerte, die von den Softwaremodulen geliefert werden, beispielsweise Zykluszeiten und Lebenszeichen.

Folgende und noch weitere² Messwerte sind beispielsweise für die Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zu berücksichtigen. Zusätzlich sind für jeden Messwert dessen Varianz und dessen Alter relevant. Je geringer die Varianz und je geringer das Alter sind, um so verlässlicher ist ein Messwert, falls keine Fehlfunktion in der Sensoreinheit oder der Verarbeitung vorliegt. In Klammern steht jeweils beispielhaft eine mögliche Quelle für die Messwerte.

- Fahrzeugtechnische Informationen:
 - Öltemperatur (Fahrzeugsensor)
 - Kühlmitteltemperatur (Fahrzeugsensor)
 - Tankinhalt (Fahrzeugsensor)
 - Bordnetzspannung (Fahrzeugsensor)
 - Reifendruck je Rad (Fahrzeugsensor)
 - Reifentemperatur je Rad (Fahrzeugsensor)
 - Beladungszustand (Schätzung durch Innenraumüberwachung)
 - Maximal mögliches Bremsmoment je Rad (Gütemaß der Fähigkeit Verzögern)
 - Zeit, bis maximal mögliches Bremsmoment anliegt (Gütemaß der Fähigkeit Verzögern)
- Fahrdynamische Informationen:
 - Aktuelle Fahrstufe (Fahrzeugsensor)
 - Aktuelle Geschwindigkeit (Fahrzeugsensor, Umfeldsensor)
 - Aktuelle Beschleunigung (Fahrzeugsensor, Umfeldsensor)
 - Aktuelle Gierrate (Fahrzeugsensor, Umfeldsensor)
 - Aktueller Lenkwinkel (Fahrzeugsensor)

²Eine vollständige Betrachtung aller Messwerte kann aufgrund deren Anzahl in einem vollständig automatisierten Fahrzeug in der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden.

- Aktueller Schwimmwinkel (Fahrzeugsensor, Umfeldsensor)
- Wahrnehmungsinformationen:
 - Fahrbahnbelag (Umfeldsensor)
 - Außentemperatur (Umfeldsensor)
 - Niederschlag (Umfeldsensor)
 - Witterungsabhängiger Fahrbahnzustand (Gütemaß der Fähigkeit Szenerie wahrnehmen)
- Hardwareinformationen:
 - Last der genutzten Prozessoren in den Steuergeräten (Software)
 - Nutzung des Speichers in den Steuergeräten (Software)
 - Lebenszeichen der Hardware (Software)
 - Last der genutzten Kommunikationskanäle (Software)
 - Latenz der genutzten Kommunikationskanäle (Software)
- Softwareinformationen:
 - Lebenszeichen der Softwarekomponenten (Software)
 - Laufzeiten der Algorithmen (Software)

Hieraus eine Aussage über die Qualität, mit der eine Fahrzeugdynamikregelung zur Verfügung steht, zu treffen, ist schwierig, da für jeden Messwert nicht nur der Wert an sich, sondern auch dessen Varianz und Alter berücksichtigt werden müssen. In *Kapitel 10.5.3* werden daher aggregierte Gütemaße eingeführt, die diese Informationen zu wenigen, aggregierten Gütemaßen zusammenfassen.

10.5 Selbstrepräsentation mittels Fähigkeitengraph

Der Fähigkeitengraph beinhaltet die Selbstrepräsentation und wird für die kontinuierliche Überwachung und zur Unterstützung der Fahrentscheidungen eines Fahrzeugführungssystems genutzt. Er leitet sich vom Fertigkeitengraph ab, der bereits in der Konzeptphase erstellt wurde. Bei der Erstellung des Fähigkeitengraphen werden die Fertigkeiten aus der Konzeptphase als Grundlage verwendet und diese dann an die Implementierung angepasst. Eine Fähigkeit leitet sich daher von einer oder mehreren Fertigkeiten ab und setzt diese durch Hinzufügen eines Fähigkeitslevels um. Beispielsweise muss der Fähigkeitengraph an die tatsächlich verbauten Umfeldsensoren oder die Anzahl der angetriebenen Räder angepasst werden. Außerdem lassen sich die Gütemaße für die Fähigkeiten basierend auf den implementierten Verfahren und Algorithmen erstellen. Hierfür ist das Expertenwissen der jeweiligen Entwickler erforderlich, da nur so die Stärken und Schwächen der Sensoren, Aktoren, Verfahren und Algorithmen berücksichtigt werden können. Aus dem Fertigkeitengraph wird durch die Implementierung der Fertigkeiten in Fähigkeiten ein Fähigkeitengraph, der Gütemaße für die aktuell verfügbare Qualität der Fähigkeiten enthält. Die verfügbare Qualität von Fähigkeiten wird vom aktuellen Systemzustand und der Situation, in der sich das vollständig automatisierte Fahrzeug befindet, beeinflusst.

Als Beispiel soll ein Ausschnitt aus dem Fertigkeitengraph in *Abbildung 6.16* in einen Fähigkeitengraph in *Abbildung 10.2* überführt werden. Dieser zeigt die Fähigkeiten und Abhängigkeiten, die zur Regelung der Fahrzeugdynamik erforderlich sind. Die Regelung der Fahrzeugdynamik ist für das vollständig automatisierte Fahrzeug zur Umsetzung der Fahrentscheidungen erforderlich. Die Fertigkeiten *Beschleunigen*, *Verzögern* und *Fahrtrichtung vorgeben* aus *Abbildung 6.16* wurden nicht direkt übernommen, sondern durch die Aktionsfähigkeiten *Lenkwinkel stellen*, *Antriebsmoment stellen*, *Bremsmoment stellen* und einen Teil der Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* ersetzt. Dieser Schritt ermöglicht eine Formulierung von Gütemaßen für die drei Aktoren, da ein Gütemaß für die mögliche Beschleunigung einer Fähigkeit *Beschleunigen*, wie im ursprünglichen Fertigkeitengraph in *Abbildung 6.16* modelliert, abhängig vom Fahrbahnzustand wäre. Diese Information liegt auf den unteren Ebenen jedoch nicht vor und steht erst in der Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* zur Verfügung.

Im Beispielgraph sind insgesamt 14 Vektoren mit Informationen enthalten, die den Informationsfluss zwischen den Fähigkeiten beschreiben.

- M1: Mögliches Bremsmoment, Standardabweichung, Alter
- M2: Mögliches Schleppmoment, Standardabweichung, Alter
- M3: Mögliches Antriebsmoment, Standardabweichung, Alter
- M4: Möglicher Lenkwinkel, Standardabweichung, Alter
- M5: Geschwindigkeit des Fahrzeugs im dreidimensionalen Raum, Standardabweichung, Alter
- M6: Geschwindigkeit des Fahrzeugs im dreidimensionalen Raum, Standardabweichung, Alter
- M7: Drehzahl je Rad, Standardabweichung, Alter
- M8: Gütemaß für das kombinierte Bremsmoment, Standardabweichung, Alter
- M9: Gütemaß für das Antriebsmoment, Standardabweichung, Alter
- M10: Gütemaß für den Lenkwinkel, Standardabweichung, Alter
- M11: Gütemaß für die Fahrzeugbewegung, Standardabweichung, Alter
- M12: Gütemaß für den Sensorsichtbereich, Standardabweichung, Alter
- M13: Siehe M11
- M14: Gütemaß für die Wahrnehmung der Fahrbahnoberfläche, Standardabweichung, Alter

10.5.1 Fähigkeitsknoten

Die Fähigkeitsknoten sind vergleichbar mit den Fertigkeitsknoten und durch ihre Abhängigkeiten von Eingangsdaten und der daraus resultierenden Leistungsfähigkeit charakterisiert.

Jede Fähigkeit beinhaltet ein oder mehrere Gütemaße, die eine Quantifizierung des aktuellen Fähigkeitenlevels ermöglichen. Diese Gütemaße repräsentieren eine spezifische Eigenschaft einer Fähigkeit.

Beispielsweise bietet die Fähigkeit *Eigenbewegung schätzen* ein Gütemaß dafür, wie gut die aktuelle Fahrzeugbewegung geschätzt werden kann. Dieses Gütemaß wird von der Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* benötigt, um die eigene Leistungsfähigkeit zu ermitteln.

10.5.2 Kanten im Fähigkeitengraph

Kanten verbinden die Fähigkeiten und repräsentieren dadurch die Abhängigkeit einer übergeordneten Fähigkeit von einer untergeordneten Fähigkeit. Die Kanten sind mit Nutzdaten, Gütemaßen und Gewichtungen der Gütemaße behaftet, sodass eine übergeordnete Fähigkeit ihr aktuelles Fähigkeitenlevel durch eine Aggregation der Gütemaße und deren Gewich-

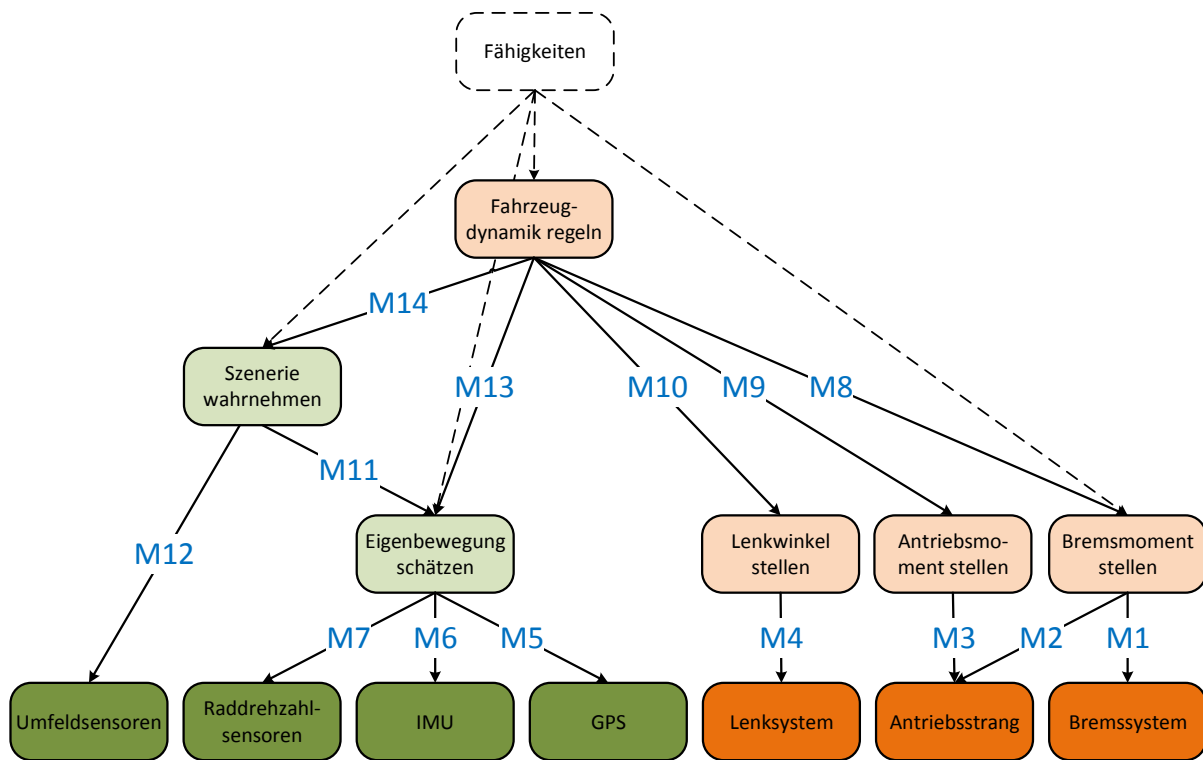


Abbildung 10.2: Ausschnitt aus einem Fähigkeitsgraph mit Vektoren für Metriken M1-M14; Hellgrün: Wahrnehmungsfähigkeiten, Grün: Sensoren, Hellorange: Aktionsfähigkeiten, Orange: Aktoren; Die gestrichelt dargestellte Box soll übergeordnete Fähigkeiten andeuten; IMU steht für *inertial measurement unit* (Deutsche Übersetzung: Inertiale Messeinheit)

tungen ermitteln kann. Zusätzlich werden hierfür Informationen aus den Hardware- und Softwarekomponenten genutzt, die eine Fähigkeit im Betrieb umsetzen.

Durch die Propagation der Fähigkeitenlevel entstehen Abhängigkeiten von den übergeordneten Fähigkeiten bis hinab zu den Fähigkeiten auf der untersten Ebene. Entsprechend propagieren sich Unsicherheiten von den untersten Ebenen auf die übergeordneten Ebenen.

Beispielsweise berechnet die Fähigkeit *Antriebsmoment stellen* das aktuell mögliche Antriebsmoment im Antriebsstrang. Diese Berechnung ist nur mit einer gewissen Standardabweichung möglich, da es keine direkte Messung mit einem perfekten Sensor gibt. Daraus resultiert eine gewisse Unsicherheit über den tatsächlichen Wert. Außerdem erfolgt die Berechnung zu einem bestimmten Zeitpunkt, der über das Alter ebenfalls mitgeteilt wird. Diese Information kann die Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* bei ihrer Aktivität berücksichtigen. Das Gütemaß für die Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* berücksichtigt das mögliche Antriebsmoment, dessen Standardabweichung und Alter, um seinerseits den Wert des Gütemaßes und die Standardabweichung zu berechnen. Daraus resultiert die Propagation von Unsicherheiten durch den Graphen von den unteren zu den höheren Ebenen.

10.5.3 Aggregierte Gütemaße als Fähigkeitenlevel

Durch Sensoren, die viele Informationen über das Fahrzeug, das Fahrzeugführungssystem und die Umwelt sammeln, entsteht eine hohe Anzahl an Messwerten in der Selbstwahrnehmung. Die Messwerte haben einen unterschiedlichen Einfluss auf die Systemfunktionen und die damit verbundenen Fahrmanöver. Daher muss für jede Quelle eines Messwerts dessen Einfluss auf die aktuelle Leistungsfähigkeit ermittelt werden. Abhängig von den Zahlenwerten der Messwerte wird anschließend die Güte von Fähigkeiten bestimmt.

Da bei einem Fahrzeug sehr viele Werte überwacht werden müssen, ist eine Interpretation der einzelnen Werte sehr umfangreich. Diese Anzahl kann durch *aggregierte Gütemaße* reduziert werden. Unter einem aggregierten Gütemaß versteht man die Aggregation von unterschiedlichen Messwerten zu einem repräsentativen Maß, welches eine Aussage über die Qualität einer Aktivität gibt. Die aggregierten Gütemaße dienen im Fähigkeitengraph als Fähigkeitenlevel und stellen eine Information bereit, wie gut eine Fähigkeit ausgeführt werden kann. Dazu wird für jeden Messwert dessen Einfluss auf jedes der Gütemaße festgelegt. Jede negative Veränderung eines oder mehrerer Messwerte führt zu einer Verringerung des Wertes eines oder mehrerer Gütemaße. Die Stärke des Einflusses von einem Messwert auf ein Gütemaß wird durch Heuristiken realisiert. Diese Heuristiken basieren, wie von Romanycia und Pelletier (1985) definiert, auf unvollständigem Wissen, und liefern daher auch keine optimalen Lösungen für die Berechnungen. Bei der Anwendung als Beziehung zwischen Messwert und Gütemaß erlauben Heuristiken jedoch eine Festlegung der Beziehung und mit wenig Rechen- und Modellierungsaufwand können aussagekräftige Gütemaße erstellt werden. Bergmiller (2014, Kapitel 8.2.3) schlägt vor, die Qualitätslevel über Fuzzy-Logik abzubilden, da durch Fuzzy-Logik Expertenwissen in die Berechnung der Fähigkeitenlevel einfließen kann. Dies erscheint sinnvoll, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher untersucht. Idealerweise würde jedes Gütemaß im Vergleich zu einer Referenz erstellt werden, damit die Werte der Gütemaße die Realität möglichst exakt abbilden. Dies kann an dieser Stelle nicht geleistet werden, da dafür das Expertenwissen aus allen betroffenen Domänen der Fähigkeiten erforderlich ist.

Das folgende Beispiel zeigt die Zusammenhänge der Berechnung des Gütemaßes für die Fähigkeit *Eigenbewegung schätzen*.

M5: Aktuelle Geschwindigkeit in x,y,z-Richtung aus GPS, Standardabweichung, Alter:

$$M5 = (v_x; v_y; v_z; \sigma_{v_x}; \sigma_{v_y}; \sigma_{v_z}; t_{Alter})$$

M6: Aktuelle Geschwindigkeit in x,y,z-Richtung aus der inertialen Messeinheit (IMU), Standardabweichung, Alter:

$$M6 = (v_x; v_y; v_z; \sigma_{v_x}; \sigma_{v_y}; \sigma_{v_z}; t_{Alter})$$

M7: Aktuelle Drehzahl je Rad, Standardabweichung, Alter:

$$M7 = (n_{r1}; n_{r2}; n_{r3}; n_{r4}; \sigma_{n_{r1}}; \sigma_{n_{r2}}; \sigma_{n_{r3}}; \sigma_{n_{r4}}; t_{Alter})$$

M11: Kombination aus $M5, M6, M7$; v_{ist} ist die aktuelle Fahrgeschwindigkeit. Das resultierende aggregierte Gütemaß für die Leistungsfähigkeit der Eigenbewegungsschätzung berechnet sich wie folgt:

$$G11[\%] = g(\vec{v}_{ist}; \sigma_{\vec{v}}; t_{Alter})$$

Der kombinierte Vektor an der Kante M11 lautet:

$$M11 = (G11; \sigma_{G11}; t_{Alter})$$

Die hier verwendete Berechnung basiert auf einem einfachen Modell zur Schätzung der Eigenbewegung und der Güte dieser Schätzung. Der Stand der Technik zu dieser Herausforderung wird beispielsweise von Steinhardt (2014) beschrieben und ein neues Verfahren wird vorgestellt. Für jedes im Fähigkeitengraph verwendete, aggregierte Gütemaß muss der Stand der Technik ebenfalls berücksichtigt werden. Aufgrund des Aufwandes kann dies in der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden, und bleibt für die zukünftige Forschung offen.

10.5.4 Zusammenfassung

Der Fähigkeitengraph kann unter Berücksichtigung der implementierungsspezifischen Details des Systems vom Fertigkeitengraph abgeleitet werden. Die aggregierten Gütemaße als Fähigkeitenlevel erlauben eine Selbstrepräsentation der Fähigkeiten des automatisierten Fahrzeugs. Die Selbstwahrnehmung wird genutzt, um die erforderlichen Messwerte zu sammeln und über die Fahrzeugsensoren, die Umfeldsensoren und die Hardware- und Softwareüberwachung zur Verfügung zu stellen. Die Gütemaße eignen sich zur Propagation von Unsicherheiten von den Fähigkeiten auf der untersten Ebenen zu den Fähigkeiten der höheren Ebenen. Hieraus lässt sich eine Selbstrepräsentation des Fahrzeugs erstellen. Diese Selbstrepräsentation als Menge von Gütemaßen wird im Folgenden genutzt, um das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs zu beeinflussen.

Die Identifikation von aussagekräftigen Gütemaßen wird an dieser Stelle als offene Forschungsfrage identifiziert. Bisher sind dem Autor nicht für alle Fähigkeiten Gütemaße bekannt, die im Fähigkeitengraph genutzt werden können. Dies ist Aufgabe der Experten

in den jeweils zugrunde liegenden Disziplinen der Fähigkeiten, beispielsweise der Umfeldwahrnehmung, der Entscheidungsfindung, der Fahrzeugregelung und der Mensch-Maschine-Interaktion.

10.6 Nutzung der Selbstrepräsentation zur Realisierung sicheren Verhaltens mittels Funktionaler Degradation

Der Fähigkeitengraph enthält eine Selbstrepräsentation des automatisierten Fahrzeugs. Die Selbstrepräsentation ist Teil der Szene, die als Grundlage für Fahrentscheidungen dient. Dadurch können Fahrentscheidungen nicht nur auf Basis des Umfelds und der Ziele und Werte des automatisierten Fahrzeugs getroffen werden, sondern auch auf Basis der eigenen Leistungsfähigkeit. Dies erhöht die Sicherheit des Betriebs des automatisierten Fahrzeugs und erlaubt eine sicherere Fahrweise.

Besonders durch die zahlreichen Unsicherheiten bei Messwerten und aufgrund von in den Algorithmen erstellten Hypothesen werden Fahrentscheidungen stets unter Unsicherheit getroffen. Die Nutzung der Selbstrepräsentation als zusätzliche Information kann diese Unsicherheit reduzieren und Fahrentscheidungen somit verbessern. Dies wurde von Ulbrich und Maurer (2013) am Beispiel von Fahrentscheidungen für Fahrstreifenwechsel vorgestellt und wird in Ulbrich (2016) umfassend beschrieben.

Eine mögliche Methode zur Reaktion auf degradierte Fähigkeitenlevel ist die Nutzung von Hardwareredundanz, Softwareredundanz und Funktionaler Redundanz zur Erhaltung der Fähigkeitenlevel. Hierfür müssen Rückfallstrategien im System verfügbar sein, die bei der Degradation von Fähigkeiten ausgelöst werden.

Die Informationen der Selbstrepräsentation können genutzt werden, um Verfahren zur Optimierung und Rekonfiguration des Fahrzeugführungssystems zu nutzen. Beispielsweise werden diese Verfahren im Projekt CCC erforscht (Reschka u. a., 2014). Diese Methoden der Rekonfiguration werden der Selbstheilung zugeschrieben, die in *Kapitel 10.6.3* betrachtet wird.

Neben der Nutzung des Fähigkeitengraphen zur Selbstrepräsentation können der Graph und die darin enthaltenen Fähigkeitenlevel als zusätzliche Information für die Entscheidungsfindung des automatisierten Fahrzeugs genutzt werden. Bei reduzierten Fähigkeitenleveln muss die Funktionalität eingeschränkt werden, damit ein sicherer Betrieb erhalten bleibt. Hierfür eignet sich das im folgenden Kapitel vorgestellte Konzept der funktionalen Degradation.

10.6.1 Funktionale Degradation

Die Selbstrepräsentation als Teil der Situation eines automatisierten Fahrzeugs erlaubt einen sichereren Betrieb, falls diese bei der Planung, Auswahl und Ausführung von Fahrentscheidungen berücksichtigt wird. Je nach Werten der Gütemaße werden die funktionalen Möglichkeiten des automatisierten Fahrzeugs eingeschränkt, um das Betriebsrisiko unterhalb des zumutbaren Risikos zu halten. Für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf ist der Nothalt im Fahrmanöver *Sicheres Anhalten* eine Möglichkeit, dies zu erreichen. Dieser ist jedoch aus Sicht der Nutzbarkeit eines automatisierten Fahrzeug ungünstig. Es ist daher

sinnvoll, die Funktionalität schrittweise und passend zu den Fähigkeiten des automatisierten Fahrzeugs zu reduzieren.

Von Norman und Bobrow (1975) wird das Prinzip der leistungsabhängigen Degradation im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Informationen im menschlichen Gehirn als „sanfte Verminderung der Leistungsfähigkeit“ (Übersetzt aus dem Englischen: *graceful degradation*) bezeichnet. Je weniger Ressourcen zur Verfügung stehen, umso geringer sind die Fähigkeiten des menschlichen Gehirns. Fehlt beispielsweise Sauerstoff im Gehirn, so wird die Denkfähigkeit eingeschränkt. Die verbliebenen Ressourcen werden für lebenserhaltende Funktionen eingesetzt.

Das *funktionale Degradation* genannte Prinzip in der vorliegenden Arbeit funktioniert ähnlich. Bei Verschlechterung der aktuellen Leistungsfähigkeit oder Andeutung einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit wird der Funktionsumfang des automatisierten Fahrzeugs eingeschränkt. Dies erfolgt auf Basis der Werte der aggregierten Gütemaße aus der Selbstrepräsentation.

Es gibt zwei Ausgangszustände für die Ermittlung der aktuellen Leistungsfähigkeit, die sich in ihrer Ursprungsannahme unterscheiden. Bei der ersten Variante geht man davon aus, dass ein System fehlerfrei funktioniert und alle Umweltbedingungen ebenfalls beherrschbar sind. Jede Veränderung der internen und externen Bedingungen führt zu einer Veränderung der Leistungsfähigkeit und somit zu einer funktionalen Degradation. Dieser Ansatz „von oben herab“ (Top-Down) wurde beispielsweise von Reschka u. a. (2012) betrachtet. Bei der zweiten Variante geht man zunächst davon aus, dass das System nicht funktionsfähig ist und das Fahrzeug nicht in der Lage ist am Straßenverkehr teilzunehmen. Schritt für Schritt wird der Funktionsumfang mit jeder funktionierenden Komponente des Systems unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen erhöht. Als Kriterium könnten hierbei Schwellwerte dienen, die von den ermittelten Gütemaßen überstiegen werden müssen. Erst wenn alle Gütemaße einen gewissen Wert übersteigen, kann die Fahrt beginnen (Winner, 2012). Beide Ansätze erzeugen das selbe Ergebnis. Das Fahrzeug führt nur die Fahrmanöver mit entsprechend angepassten Parametern aus, die es sicher beherrscht. Die funktionale Degradation erlaubt somit ein Verhalten des Systems ähnlich zu einem Fahrer. Dieser kann seine Fahrweise, beispielsweise aufgrund von Müdigkeit, ungünstigen Witterungsbedingungen oder der Verkehrsdichte, ändern und so sicherer fahren.

Je nach aktueller Situation und den möglichen Aktionen des Fahrzeugs werden eine oder mehrere Aktionen ausgewählt, die einen sicheren Zustand erhalten und gleichzeitig die Fähigkeiten des Fahrzeugs so wenig wie möglich einschränken. Dafür stehen unterschiedliche Aktionen zur Verfügung, die in verschiedene Teile des Systems eingreifen können. Diese teilen sich in vier Gruppen von Aktionen auf:

- Regelparameter verändern
- Fahrmanöver verändern
- Fahrmanöver verbieten
- Sicheres Anhalten ausführen

Regelparameter verändern Durch die direkte Möglichkeit, Einfluss auf die Fahrzeugregelung zu nehmen, können die Parameter für die Längs- und Querregelung des Fahrzeugs

in gewissem Rahmen sehr kurzfristig verändert werden. Beispielsweise können der Sicherheitsabstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen erhöht, die maximale Geschwindigkeit oder die maximale Beschleunigung begrenzt und der Lenkwinkel und die Lenkgeschwindigkeit reduziert werden. Diese Einschränkungen wirken sich in sehr kurzer Zeit (< 1 Sekunde) aus, so dass sehr schnell reagiert werden kann.

Fahrmanöver verändern Nicht nur in der Regelung kann auf die Fahrmanöver Einfluss genommen werden, sondern auch in der Planung der Trajektorie und der Geschwindigkeit. Beispielsweise kann es aufgrund der aktuellen Leistungsfähigkeit notwendig sein, die Länge eines Fahrstreifenwechsels zu verändern, um diesen sicher genug ausführen zu können. Mögliche Parameter, die verändert werden können, sind die zu fahrende Krümmung und die zu fahrende Geschwindigkeit des Fahrzeugs in einem Manöver. Die möglichen Fahrmanöver bleiben in diesem Fall erhalten. Auch der Bereich, in dem eine Trajektorie geplant wird, kann eingeschränkt werden. Beispielsweise sollten ein schlechter Straßenzustand oder eine verminderte Sichtweite der Umfeldwahrnehmung zu einem größeren Sicherheitsabstand des automatisierten Fahrzeugs zu anderen Verkehrsteilnehmern und dem Straßenrand führen.

Fahrmanöver verbieten Aufgrund der Situation, in der sich das vollständig automatisierte Fahrzeug befindet, und dem eigenen Systemzustand kann es sein, dass verschiedene Fahrmanöver nicht mehr sicher ausgeführt werden können. Es ist daher notwendig, abhängig von der aktuellen Leistungsfähigkeit einzelne oder mehrere Fahrmanöver zu verbieten. Das Verbot von Fahrmanövern schränkt den Funktionsumfang ein und kann dazu führen, dass die Route der geplanten Mission umgeplant werden muss oder die Mission nicht mehr erfolgreich absolviert werden kann. Fällt beispielsweise ein Umfeldsensor aus, der den Bereich auf einer Seite neben dem Fahrzeug abdeckt, so darf auf diese Seite kein Fahrstreifenwechsel mehr ausgeführt werden.

Sicheres Anhalten ausführen Wenn eine Gefährdung droht und nur durch Veränderung der aktuellen Regelung oder der geplanten Trajektorie kein sicherer Zustand erhalten werden kann, wird eine Ausprägung des Fahrmanövers *Sicheres Anhalten* ausgeführt. Je nach Situation wird entweder der Straßenverkehr verlassen, es wird die letzte geplante Bahn abgefahren und angehalten, oder es erfolgt ein Nothalt. Zusammen mit einer Warnung der anderen Verkehrsteilnehmer und der Umgebung durch Licht- und Hupzeichen kann ein sicherer Zustand erreicht werden.

10.6.2 Beispielhafte Anwendung auf das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf

Eine Herausforderung zur Erreichung sicheren Verhaltens ist die Interpretation der aktuellen Situation inklusive der Selbstrepräsentation und das Ableiten der erforderlichen Maßnahmen der funktionalen Degradation der Fahrmanöver und der Auswahl der Fahrmanöver. Ulbrich (2016, Kapitel 10) stellt ein Konzept zur taktischen Verhaltensplanung vor, das dies zumindest für Fahrstreifenwechsel ermöglicht. Die Frage, wie sich das Konzept auf das vollständig automatisierte Fahrzeug übertragen lässt, ist noch offen und kann in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet werden. Fest steht jedoch, dass das von Ulbrich (2016) beschriebene Vorgehen genutzt werden kann, um alle Aspekte einer Situation bei der Fahrentscheidung zu berücksichtigen.

Ein Teil der Herausforderung besteht darin, Schwellwerte zu finden, die die Grenze von einem sicheren Zustand in einen unsicheren Zustand repräsentieren. Ein Fahrmanöver darf beispielsweise nur dann ausgeführt werden, wenn alle Fähigkeiten unterhalb der Schwellwerte liegen und das Fahrmanöver dadurch sicher wird. Dies lässt sich folgendermaßen formulieren: Falls für alle Gütemaße G_i der Fähigkeiten, von denen ein Fahrmanöver abhängt, gilt, dass $G_i \leq G_{sicher_i}$, dann kann ein Fahrmanöver sicher ausgeführt werden.

Die Sicherheitsanforderung SA1 in *Kapitel 10.1* aus dem pathologischen Szenario des plötzlich auf die Fahrbahn tretenden Fußgängers in *Kapitel 6.1.2* wird im Folgenden zusammen mit dem Fähigkeitengraph aus *Abbildung 10.2* betrachtet.

Das Fahrzeug muss in der Lage sein, rechtzeitig vor einem plötzlich auf die Fahrbahn tretenden Fußgänger anzuhalten. Hierfür sind drei Gütemaße besonders zu beachten:

1. Die Sichtweite der Sensorik
2. Die Reaktionszeit von der Wahrnehmung des Fußgängers bis zur Aktion des Fahrzeugs
3. Die aktuell mögliche Verzögerung des Fahrzeugs

Zur Vereinfachung wird aus dem Fähigkeitengraph nur die übergeordnete Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* betrachtet und hier die Gütemaße in den Vektoren $M8$, $M13$ und $M14$. Das Gütemaß *aktuell mögliche Verzögerung* kann basierend auf diesen Informationen in der Fähigkeit *Fahrzeugdynamik regeln* berechnet werden, so dass dieses von der Fahrentscheidung genutzt werden kann. Das Gütemaß basiert in diesem Beispiel auf dem möglichen Bremsmoment, der eigenen Geschwindigkeit und der Beschaffenheit der Straßenoberfläche.

Es wird nun die Situation wahrgenommen, in der ein Fußgänger plötzlich auf die Fahrbahn treten könnte, zum Beispiel weil der Fahrbahnrand durch geparkte Fahrzeuge oder andere Objekte teilweise oder vollständig verdeckt ist. Basierend auf der Sensorsichtweite zum Fahrbahnrand, der im System aktuell geschätzten Reaktionszeit und der aktuell möglichen Verzögerung kann eine maximale Geschwindigkeit berechnet werden, die sicher ist. Diese wäre dann beispielsweise Teil der Fähigkeit Fahrmanöver folgen, wenn der Fertigkeitengraph aus *Abbildung 6.16* in einen Fähigkeitengraph überführt ist.

Der Vorteil an diesem Vorgehen liegt in der Möglichkeit, das vollständig automatisierte Fahrzeug vorausschauend und vorsichtig fahren zu lassen. Durch die Umfeldwahrnehmung und die Selbstwahrnehmung werden alle für einen sicheren Betrieb erforderlichen Messwerte gesammelt. Durch die aggregierten Gütemaße kann die Leistungsfähigkeit des vollständig automatisierten Fahrzeugs in der aktuellen Situation abgebildet werden. Wird diese Leistungsfähigkeit genutzt, um Fahrentscheidungen zu treffen, so kann das vollständig automatisierte Fahrzeug immer unterhalb des zumutbaren Risikos betrieben werden.

Die optimale Integration der Selbstrepräsentation zur Realisierung sicheren Verhaltens wurde in der vorliegenden Arbeit angedacht. Es war jedoch nicht möglich, einen vollständigen Ansatz dafür zu entwickeln, zu implementieren und zu evaluieren. Dies ist eine offene Forschungsfrage und wird sicherlich in Zukunft untersucht werden.

Parallel zu den vorgestellten Aktionen kann im Betrieb versucht werden, die Leistungsfähigkeit des vollständig automatisierten Fahrzeugs im Fall einer Degradation zu erhöhen. Dies kann einerseits ohne aktive Mitwirkung des automatisierten Fahrzeugs durch eine Veränderung der Umweltbedingungen geschehen, beispielsweise weil sich die Wetterbedingungen ändern oder der Straßenverlauf keine Randbebauung hat. Andererseits können bei internen

Systemfehlern Aktionen der Selbstheilung ausgeführt werden. Diese werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

10.6.3 Erhöhung der Leistungsfähigkeit mittels Selbstheilung

Die Selbstheilung vereint Aktionen, um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Von Ghosh u. a. (2007) werden die Eigenschaften selbstheilender Systeme vorgestellt. Selbstheilende Systeme sind in der Lage durch Rekonfiguration, Rekalibrierung oder Kalt- und Warmstarts von Komponenten auf eine degradierte Funktionalität zu reagieren. Neben der Diagnosefähigkeit benötigen Sensoren, Hardware, Software und Aktoren daher auch Selbstheilungsfunktionen. Im einfachsten und vermutlich häufigsten Fall ist dies ein Neustart der fehlerhaften Komponente. Im Bereich der Umfeldsensorik könnte beispielsweise eine Neukalibrierung eines Sensors zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit führen. Im Idealfall erfolgt diese während des Betriebs.

Ein großer Teil der Funktionalität eines automatisierten Fahrzeugs ist durch Software realisiert. Sowohl die dafür notwendige Hardware als auch die Software können durch einen technischen Fehler funktionsunfähig werden. Bei einzelnen Softwaremodulen lässt sich die Funktionalität dieser eventuell durch einen Neustart der Software wieder herstellen. Bei einem Hardwaredefekt kann ebenfalls ein Neustart des Geräts durchgeführt werden. Je nach Systemstruktur ist dies aber mit Ausfällen von mehreren Softwarekomponenten verbunden, wenn diese auf der gleichen Hardware betrieben werden. Die Leistungsfähigkeit des Systems würde in solch einem Fall kurzzeitig verringert werden, bevor dann wieder alle betroffenen Komponenten funktionsfähig sind.

Neben dem Neustart steht die Umschaltung auf redundante Hardware als weitere Möglichkeit zur Verfügung. Falls ein Modul ausfällt, das redundant ausgelegt ist, kann innerhalb kürzester Zeit auf einen Systemfehler reagiert werden. Dadurch wird die Leistungsfähigkeit des Systems erhalten beziehungsweise kurzfristig wieder hergestellt. Je nach eingesetzter Hardware, beispielsweise in der Umfeldsensorik, können weitere Optionen zur Selbstheilung zur Verfügung stehen. Ein Beispiel sind bildgebende Kameras. Diese sind abhängig von den Lichtverhältnissen. Ändern sich die Lichtverhältnisse, so können eine Rekalibrierung der Kamera oder ein Weißabgleich notwendig werden.

Als Entscheidungsgrundlage für die Selbstheilung sind die Gütemaße relevant. Jedes Gütemaß steht in Beziehung zu Hardware und Software, die eine Fähigkeit im System anbieten. Fällt ein Gütemaß unter eine gewisse Schwelle oder kann es überhaupt nicht mehr berechnet werden, so können die betroffenen Komponenten durch Aktionen der Selbstheilung je nach Situation wieder betriebsbereit werden.

Zusammenfassend erscheint es sinnvoll, die Selbstheilung parallel zur funktionalen Degradation einzusetzen. Wenn es möglich ist, sollten Softwarekomponenten auf unabhängiger Hardware arbeiten, damit bei Hardwarefehlern immer nur Teile des Systems ausfallen. Besonders wichtige Komponenten sollten redundant ausgelegt sein, um eine schnelle Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit zu ermöglichen.

Wie eine Selbstheilung im Betrieb realisiert werden kann, konnte in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden. Die Arbeit beschränkt sich auch an dieser Stelle auf ein Konzept, das noch verfeinert, implementiert und evaluiert werden muss. Dies ist ein zukünftiger Forschungsbedarf, der basierend auf der Selbstrepräsentation angegangen werden muss.

10.7 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Vorgehensweise zur Erstellung eines funktionalen Sicherheitskonzepts und ein funktionales Sicherheitskonzept für vollständig automatisierte Fahrzeuge vorgestellt. Durch die Nutzung der Selbstrepräsentation, der funktionalen Degradation und der Selbstheilung kann ein sicherer Betrieb ermöglicht werden. Der Vorteil des erstellten Sicherheitskonzepts liegt in der allgemeinen Anwendbarkeit auf alle Szenarien und alle möglichen Fehlerfälle. Sowohl Umweltbedingungen als auch interne Systemzustände fließen in die Gütemaße ein. Die Selbstrepräsentation wird dadurch zu einer Grundlage für die Fahrentscheidung. Durch die permanente Überwachung und Aktualisierung der Selbstrepräsentation kann das vollständig automatisierte Fahrzeug schnell auf Veränderungen der Leistungsfähigkeit reagieren und gegebenenfalls sicher Anhalten.

Aufgrund der fehlenden Implementierung und Evaluation des funktionalen Sicherheitskonzepts, fehlt der praktische Nachweis, dass damit ein sicherer Betrieb möglich wird. Aktueller Forschungsgegenstand ist die Implementierung für reduzierte Fahrfunktionen, beispielsweise einem Tempomaten und einem Ausweichassistenten im Rahmen des CCC Projekts und in der zukünftigen Forschung im Projekt Stadtpilot. Die bisherigen Überlegungen aus dem Projekt Stadtpilot deuten jedoch daraufhin, dass mit dem funktionalen Sicherheitskonzept ein sicherer Betrieb möglich wird.

11 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel folgen eine Zusammenfassung der Inhalte der vorliegenden Arbeit, eine Zusammenstellung der neuen Forschungsfragen, die sich während der Anfertigung der vorliegenden Arbeit gestellt haben, und ein Ausblick auf die aktuellen Herausforderungen für den sicheren Betrieb von automatisierten Fahrzeugen.

Zusammenfassung

Bei der bisherigen Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen lag der Schwerpunkt auf der funktionalen Seite. Dadurch kamen Demonstrationen zustande, die Möglichkeiten und Chancen des automatisierten Fahrens aufgezeigt haben. In der vorliegenden Arbeit lag der Schwerpunkt auf der Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen.

Im ersten Teil wurden die Rahmenbedingungen beschrieben, wichtige Begriffe definiert und die Terminologie für die vorliegende Arbeit festgelegt. Da es im Bereich automatisierter Fahrzeuge bisher nur wenig Forschung zur Sicherheit dieser gibt, wurden neben Fahrerassistenzsystemen und Fahrzeugführungssystemen auch die Robotik, der Bahnbereich, die Luftfahrt und die Kraftwerkstechnik zur Ermittlung des Stands der Forschung und Technik betrachtet. Als Ergebnis stehen unterschiedliche Konzepte und Verfahren zur Verfügung, die sich für automatisierte Fahrzeuge eignen.

Im zweiten Teil wurde der Entwicklungsprozess für elektronische Fahrzeugsysteme nach Norm ISO 26262 betrachtet. Der Fokus lag auf der Anwendbarkeit auf automatisierte Fahrzeuge. Aufgrund der in der Norm unzureichend beschriebenen Verfahren zur Erstellung der funktionalen Anforderungen für elektronische Fahrzeugsysteme, reicht das in der Norm beschriebene Vorgehen nicht aus, um ein sicheres automatisiertes Fahrzeug zu entwickeln. Daher wurde ein Vorschlag für die Prozessschritte zur Erstellung der Item-Definition erstellt. Dieser berücksichtigt den Anwendungsfall, den Automatisierungsgrad und die Szenarien, die im Anwendungsfall auftreten können.

Pathologische Szenarien dienten als Ausgangspunkt für die Identifikation von Sollverhalten, erforderlichen Fahrmanövern und Fertigkeiten. Der Fertigkeitengraph wurde als neues Werkzeug zur Modellierung eines automatisierten Fahrzeugs in die Prozessschritte zur Erstellung einer Item-Definition nach Norm ISO 26262 integriert. Die resultierenden, erforderlichen Fertigkeiten werden von der funktionalen Systemarchitektur umgesetzt.

Die beispielhafte Durchführung des Entwicklungsprozesses für das vollständig automatisierte Fahrzeug auf Abruf hat zu einem Anforderungskatalog geführt, der bereits während der funktionalen Beschreibung des Systems Anforderungen zum sicheren Verhalten enthält.

Im dritten Teil wurde ein Sicherheitskonzept entworfen, das diese Anforderungen berücksichtigt. Durch eine Gefährdungsanalyse und Risikobewertung wurden beispielhaft ASIL für verschiedene gefährliche Ereignisse vergeben und Sicherheitsziele abgeleitet. Dies geschah erneut auf Basis der pathologischen Szenarien. Zu den Sicherheitszielen für das pathologische Szenario des plötzlich auf die Fahrbahn tretenden Fußgängers wurden Sicherheitsanforderungen formuliert. Da diese sehr viele Fertigkeiten und funktionale Komponenten betreffen, wurde daraus ein allgemeiner Ansatz für das Sicherheitskonzept entwickelt. Der Fertigkeitengraph wurde in einen Fähigkeitengraph zur Selbstrepräsentation mittels aggregierter

Gütemaße überführt. Dadurch kann die aktuelle Leistungsfähigkeit des automatisierten Fahrzeugs ermittelt werden. Durch funktionale Degradation und Selbstheilung kann auf eine reduzierte Leistungsfähigkeit reagiert werden und diese wieder erhöht werden.

Durch die Integration des Fertigkeitengraphen in den Entwicklungsprozess und die Nutzung des Fähigkeitengraphen mit aggregierten Gütemaßen zur Selbstrepräsentation ist es möglich den Betrieb des vollständig automatisierten Fahrzeugs sicher zu gestalten. Aufgrund der identifizierten ASIL können die betroffenen Hardware- und Softwarekomponenten entsprechend entwickelt werden.

Identifizierter Forschungsbedarf

Die Rahmenbedingungen für den Betrieb von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr werden bereits intensiv diskutiert. Rechtliche Änderungen sind erforderlich, bevor tatsächlich Fahrzeuge mit den Automatisierungsgraden 3, 4 und 5 in Europa zugelassen werden dürfen.

Es fehlen derzeit Gütemaße und Werte, wie sicher automatisierte Fahrzeuge im Betrieb sein müssen. Hieraus resultiert die Frage nach dem Ziel auf das ein Sicherheitskonzept hin entwickelt werden muss. Reicht es aus, wenn ein automatisiertes Fahrzeug retrospektiv weniger Unfälle verursacht als ein durchschnittlicher oder ein sehr guter menschlicher Fahrer? Diese Frage kann bisher nicht beantwortet werden und auch die ASIL nach der Norm ISO 26262 geben hierauf keine Antwort.

Wird zukünftig ein solches Maß gefunden und ein Wert festgelegt, der für alle Beteiligten akzeptabel ist und somit die Schwelle für ein zumutbares Risiko definiert, stellt sich die Frage, wie der Nachweis der Sicherheit erreicht werden kann. Auch hierfür gibt es bisher noch keine Lösung.

Eine weitere Herausforderung stellen die ethischen Aspekte des automatisierten Fahrens dar. Es ist bisher noch offen, wie viel Kooperation von automatisierten Fahrzeugen erwartet wird und wie automatisierte Fahrzeuge die Gefährdungen unterschiedlicher Beteiligter bei drohenden oder unvermeidlichen Kollisionen priorisieren sollen.

Aus technologischer Sicht sind die Umfeldwahrnehmung, die Planung und Auswahl von Fahrentscheidungen und die Ermittlung der eigenen Leistungsfähigkeit besonders hervorzuheben. Die vollständige und zuverlässige Wahrnehmung des Umfelds ist stets mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten wirken sich auf die Planung und Auswahl von Fahrentscheidungen aus. Methoden wie zum Beispiel das Parametrisieren von Algorithmen durch das Lernen mit mehrschichtigen künstlichen neuronalen Netzen eröffnen hier neue Möglichkeiten.

Ausblick

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Sicherheitskonzept mit Selbstwahrnehmung und Selbstrepräsentation kann zu einem sicheren Betrieb von automatisierten Fahrzeugen beitragen. Dieses hat vier offene Herausforderungen.

Es müssen genügend Szenarien betrachtet werden, um die Fertigkeiten des automatisierten Fahrzeugs abzuleiten. Wann diese Menge an Szenarien ausreichend groß ist, muss erst noch erforscht werden. Die pathologischen Szenarien sind als Ausgangspunkt nutzbar, müssen jedoch um zusätzliche Szenarien erweitert werden.

Es müssen repräsentative Gütemaße für die Abhängigkeiten der Fähigkeiten identifiziert werden. Dies kann nur durch Experten auf den jeweiligen Gebieten der Fähigkeiten erfolgen und ist abhängig von der konkreten Implementierung eines Systems.

Die Nutzung der Selbstrepräsentation muss bei der Planung und Auswahl von Fahrentscheidungen berücksichtigt werden. Heuristiken, Fuzzy-Logik oder andere Verfahren können genutzt werden, um den Einfluss der aggregierten Gütemaße auf Fahrentscheidungen festzulegen. Diese funktionale Degradation eignet sich, um das System sicherer am Straßenverkehr teilnehmen zu lassen.

Ein automatisiertes Fahrzeug wird nicht fehlerfrei entwickelt werden können. Es ist daher erforderlich, auf interne Fehler zu reagieren, indem sich das System selbst heilen kann. Die aggregierten Gütemaße der Selbstrepräsentation können genutzt werden, um Aktionen der Selbstheilung zu starten. Wie dies erfolgt ist implementierungsabhängig.

Es erscheint möglich und mittlerweile wahrscheinlich, dass vollständig automatisierte Fahrzeuge am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen. Im Jahr 2000 hat Maurer (2000) seine Dissertation mit folgendem Satz geschlossen:

Ob jemals Kraftfahrzeuge autonom auf öffentlichen Straßen unterwegs sein werden, hängt mehr vom politischen Willen als von der technischen Machbarkeit ab.

(Maurer, 2000, Seite 161)

Heute sehe ich sowohl in der Politik als auch auf der technologischen Seite den Willen, vollständig automatisierte Fahrzeuge in den Straßenverkehr zu bringen. Ob jemals vollständig automatisierte Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen unterwegs sind, hängt von der Akzeptanz der Gesellschaft ab.

Eigene Veröffentlichungen

- BAGSCHIK, G.; MENZEL, T.; RESCHKA, A.; MAURER, M.: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting, Deutschland : Uni-DAS e.V., 2017, S. 125–135
- BAGSCHIK, G.; RESCHKA, A.; STOLTE, T.; MAURER, M.: Identification of Potential Hazardous Events for an Unmanned Protective Vehicle. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Göteborg, Schweden : IEEE, 2016, S. 691–697
- GASSER, T. M.; SCHMIDT, E.; BENGLER, K.; CHIELLINO, U.; DIEDERICH, F.; ECKSTEIN, L.; FLEMISCH, F.; FRAEDRICH, E.; FUCHS, E.; GUSTKE, M.; HOYERAND, R.; HÜTTINGER, M.; JIPP, M.; KÖSTER, F.; KÜHN, M.; LENZ, B.; LOTZ-KEENS, C.; MAURER, M.; MEURER, M.; MEURESCH, S.; MÜLLER, N.; REITTER, C.; RESCHKA, A.; RIEGELHUTH, G.; RITTER, J.; SIEDERSBERGER, K.; STANKOWITZ, W.; TRIMPOP, R.; ZEEB, E.: Bericht zum Forschungsbedarf - Runder Tisch Automatisiertes Fahren - AG Forschung / Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch-Gladbach, Deutschland, 2015. – Forschungsbericht
- GASSER, T. M.; SCHMIDT, E.; BENGLER, K.; CHIELLINO, U.; DIEDERICH, F.; ECKSTEIN, L.; FLEMISCH, F.; FRAEDRICH, E.; FUCHS, E.; GUSTKE, M.; HOYERAND, R.; HÜTTINGER, M.; JIPP, M.; KÖSTER, F.; KÜHN, M.; LENZ, B.; LOTZ-KEENS, C.; MAURER, M.; MEURER, M.; MEURESCH, S.; MÜLLER, N.; REITTER, C.; RESCHKA, A.; RIEGELHUTH, G.; RITTER, J.; SIEDERSBERGER, K.; STANKOWITZ, W.; TRIMPOP, R.; ZEEB, E.: Report on the Need for Research - Round Table Automated Driving - Research Working Group / Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch-Gladbach, Deutschland, 2015. – Forschungsbericht
- MATTHAEI, R.; RESCHKA, A.; BAGSCHIK, G.; ESCHER, M.; MENZEL, T.; RIEKEN, J.; SCHEIDE, T.; SCHULDT, F.; ULBRICH, S.; WENDLER, J. T.; HECKER, P.; MAURER, M.: Das Projekt Stadtpilot - Automatisiertes Fahren an der TU Braunschweig. In: *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft* 01/2015 (2015), Nr. 1, S. 12–23
- MATTHAEI, R.; RESCHKA, A.; RIEKEN, J.; DIERKES, F.; ULBRICH, S.; WINKLE, T.; MAURER, M.: Autonomes Fahren. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015, S. 1139–1165
- MATTHAEI, R.; RESCHKA, A.; RIEKEN, J.; DIERKES, F.; ULBRICH, S.; WINKLE, T.; MAURER, M.: Autonomous Driving. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbook of Driver Assistance Systems*. Springer International Publishing, 2016, S. 1519–1556
- MAURER, M. (Hrsg.); MATTHAEI, R. (Hrsg.); RESCHKA, A. (Hrsg.): *Elektronische Fahrzeugsysteme 2014, Jahresbericht: Akademisches Jahr 2013/2014*. Braunschweig, Deutschland, 2014

- MAURER, M. (Hrsg.); RESCHKA, A. (Hrsg.): *Elektronische Fahrzeugsysteme 2015, Jahresbericht: Akademisches Jahr 2014/2015*. Braunschweig, Deutschland, 2015
- MAURER, M. (Hrsg.); RESCHKA, A. (Hrsg.): *Elektronische Fahrzeugsysteme 2016, Jahresbericht: Akademisches Jahr 2015/2016*. Braunschweig, Deutschland, 2016
- NOTHDURFT, T.; HECKER, P.; OHL, S.; SAUST, F.; MAURER, M.; RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.: Stadtpilot: First fully autonomous test drives in urban traffic. In: *2011 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Washington DC, USA : IEEE, 2011, S. 919–924
- RESCHKA, A.: Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 490–513
- RESCHKA, A.: Safety Concept for autonomous vehicles. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomous Driving - Technical, Legal and Social Aspects*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016
- RESCHKA, A.; BAGSCHIK, G.; MAURER, M.: Towards a System-wide safety concept for automated road vehicles. In: WINNER, H. (Hrsg.); PROKOP, G. (Hrsg.); MAURER, M. (Hrsg.): *Automotive Systems Engineering* Bd. 2. Springer Vieweg, 2016. – angenommen zur Veröffentlichung
- RESCHKA, A.; BAGSCHIK, G.; ULBRICH, S.; NOLTE, M.; MAURER, M.: Ability and skill graphs for system modeling, online monitoring, and decision support for vehicle guidance systems. In: *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Seoul, Korea : IEEE, 2015, S. 933–939
- RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.; GAČNIK, J.; KÖSTER, F.; WILLE, J. M.; MAURER, M.: Development of Software for Open Autonomous Automotive Systems in the Stadtpilot-Project. In: *8th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2011)*. Hamburg, Deutschland : Technische Universität Hamburg-Harburg, 2011, S. 81–86
- RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.; NOTHDURFT, T.; HECKER, P.; LICHTÉ, B.; MAURER, M.: A Surveillance and Safety System based on Performance Criteria and Functional Degradation for an Autonomous Vehicle. In: *2012 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Anchorage, AK, USA : IEEE, 2012, S. 237–242
- RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.; SAUST, F.; LICHTÉ, B.; MAURER, M.: Safe, Dynamic and Comfortable Longitudinal Control for an Autonomous Vehicle. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Alcalá des Henares, Spanien : IEEE, 2012, S. 346–351
- RESCHKA, A.; MAURER, M.: Conditions for a safe state of automated road vehicles. In: *it - information technology* 57 (2015), Nr. 4, S. 215–222
- RESCHKA, A.; NOLTE, M.; STOLTE, T.; SCHLATOW, J.; ERNST, R.; MAURER, M.: Specifying a middleware for distributed embedded vehicle control systems. In: *2014 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. Hyderabad, Indien : IEEE, 2014, S. 117–122

- RESCHKA, A.; RIEKEN, J.; MAURER, M.: Entwicklungsprozess von Kollisionsschutzsystemen für Frontkollisionen: Systeme zur Warnung, zur Unfallschwereminderung und zur Verhinderung. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015, S. 913–935
- RIEKEN, J.; RESCHKA, A.; MAURER, M.: Development Process of Forward Collision Prevention Systems. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbook of Driver Assistance Systems*. Springer International Publishing, 2016, S. 1177–1206
- STOLTE, T.; BAGSCHIK, G.; RESCHKA, A.; MAURER, M.: Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen (aFAS). In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, Deutschland : ITS Niedersachsen, 2015, S. 370–390
- STOLTE, T.; RESCHKA, A.; BAGSCHIK, G.; MAURER, M.: Towards Automated Driving: Unmanned Protective Vehicle for Highway Hard Shoulder Road Works. In: *2015 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Las Palmas, Spanien : IEEE, 2015, S. 672–677
- ULBRICH, S.; MENZEL, T.; RESCHKA, A.; SCHULDT, F.; MAURER, M.: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation and Scenario for Automated Driving. In: *2015 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Las Palmas, Spanien : IEEE, 2015, S. 982–988
- ULBRICH, S.; MENZEL, T.; RESCHKA, A.; SCHULDT, F.; MAURER, M.: Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting, Deutschland : Uni-DAS e.V., 2015, S. 105–118

Literaturverzeichnis

- [Abendroth und Bruder 2015] ABENDROTH, B.; BRUDER, R.: Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 3–16
- [Aeberhard und Kämpchen 2011] AEERHARD, M.; KÄMPCHEN, N.: High-level sensor data fusion architecture for vehicle surround environment perception. In: *8th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2011)*. Hamburg, Deutschland : Technische Universität Hamburg-Harburg, 2011, S. 173–178
- [Albers u. a. 2006] ALBERS, A.; BRUDNIOK, S.; OTTNAD, J.; SAUTER, C.; SED-CHAICHARN, K.: Upper Body of a new Humanoid Robot - the Design of ARMAR III. In: *6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Genua, Italien : IEEE, 2006, S. 308–313
- [Angenendt 1987] ANGENENDT, W.: Situationsbezogene Sicherheitskriterien im Strassenverkehr. Bergisch Gladbach : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bereich Unfallforschung, 1987 (18). – Forschungsbericht
- [Antsaklis u. a. 1989] ANTSAKLIS, P.; PASSINO, K.; WANG, S.: Towards Intelligent Autonomous Control Systems: Architecture and Fundamental Issues. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 1 (1989), Nr. 4, S. 315–342
- [Ardelt u. a. 2012] ARDELT, M.; COESTER, C.; KÄMPCHEN, N.: Highly Automated Driving on Freeways in Real Traffic Using a Probabilistic Framework. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2012), Nr. 4, S. 1576–1585
- [Bagschik u. a. 2016] BAGSCHIK, G.; RESCHKA, A.; STOLTE, T.; MAURER, M.: Identification of Potential Hazardous Events for an Unmanned Protective Vehicle. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Göteborg, Schweden : IEEE, 2016, S. 691–697
- [Bainbridge 1983] BAINBRIDGE, L.: Ironies of Automation. In: *Automatica* 19 (1983), Nr. 6, S. 775–779
- [Barényi 1951] BARÉNYI, B.: *Kraftfahrzeug, insbesondere zur Berförderung von Personen*. 1951. – Patent DE 854157
- [Barényi 1963] BARÉNYI, B.: *Sicherheitslenkwelle für Kraftfahrzeuge*. 1963. – Patent DE 1303280
- [Bartels u. a. 2015] BARTELS, A.; EBERLE, U.; KNAPP, A.: *AdaptIVe Deliverable D2.1 // System Classification and Glossary*. 2015

- [Bartels 2012] BARTELS, A.: *Systembeschreibung automatischer Fahrfunktionen*. S. 28–44. In: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*, Wirtschaftsverband NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2012
- [Bartels u. a. 2012] BARTELS, A.; RUCHATZ, T.; BROSIG, S.: Intelligenz im Automobil der Zukunft. In: *Braunschweiger Verkehrskolloquium*. Braunschweig, Deutschland : DLR, 2012
- [Basarke u. a. 2007] BASARKE, C.; BERGER, C.; RUMPE, B.: Software & Systems Engineering Process and Tools for the Development of Autonomous Driving Intelligence. In: *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication* 4 (2007), Nr. 12, S. 1158–1174
- [von Benda 1985] BENDA, H. von: Die Häufigkeit von Verkehrssituationen. Bergisch Gladbach, Germany : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bereich Unfallforschung, 1985 (116). – Forschungsbericht
- [Benmimoun u. a. 2012] BENMIMOUN, M.; PÜTZ, A.; AUST, M. L.; FABER, F.; SÁNCHEZ, D.; METZ, B.; SAINT PIERRE, G.; GEISLER, T.; GUIDOTTI, L.; MALTA, L.: *euroFOT SP6 D6.1 Final evaluation results*. 2012
- [Bergholz 2003] BERGHOLZ, P. A.: *Bewegungsfertigkeiten im Sportunterricht - Theoretische Überlegungen, Analysen und empirische Befunde zum fertigkeitsspezifischen Leistungsspektrum bei Schulanfängern*, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Dissertation, 2003
- [Bergmiller 2014] BERGMILLER, P.: *Towards Functional Safety in Drive-by-Wire Vehicles*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2014
- [Bertozzi u. a. 2011] BERTOZZI, M.; BOMBINI, L.; BROGGI, A.; CARDARELLI, E.; CATTANI, S.; CERRI, P.; FEDRIGA, R. I.; FELISA, M.; GATTI, L.; GRISLERI, P.; MAZZEI, L.; MEDICI, P.; PORTA, P. P.; ZANI, P.; BUZZONI, M.; COATI, A.; GIACOMAZZO, A.; DEBATTISTI, S.; FALZONI, A.; LAGHI, M. C.; PANCIOLO, M.; VERSARI, P.: VIAC: An out of ordinary experiment. In: *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Baden-Baden, Deutschland : IEEE, 2011, S. 175–180
- [Bertozzi u. a. 2013] BERTOZZI, M.; BROGGI, A.; COATI, A.; FEDRIGA, R. I.: A 13,000 km Intercontinental Trip with Driverless Vehicles: The VIAC Experiment. In: *Intelligent Transportation Systems Magazine* 5 (2013), Nr. 1, S. 28–41
- [Böhmer 2017] BÖHMER, J. R.: *Persönliche Kommunikation*. 2017
- [Bicchi u. a. 2008] BICCHI, A.; PESHKIN, M. A.; COLGATE, J. E.: Safety for Physical Human-Robot Interaction. In: SICILIANO, B. (Hrsg.); KHATIB, O. (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, S. 1335–1346
- [Binfet-Kull u. a. 1998] BINFET-KULL, M.; HEITMANN, P.; AMELING, C.: System safety for an autonomous vehicle. In: *1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Stuttgart, Deutschland : IEEE, 1998, S. 469–474

- [Bley u. a. 2011] BLEY, O.; KUTZNER, R.; FRIEDRICH, B.; SAUST, F.; WILLE, J. M.; MAURER, M.; WOLF, F.; NAUMANN, S.; JUNGE, M.; LANGENBERG, J.; NIEBEL, W.; SCHÜLER, T.; BOGENBERGER, K.: Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung. In: *AAET 2011 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, Deutschland : ITS Niedersachsen, 2011, S. 57–77
- [Bley u. a. 2012] BLEY, O.; KUTZNER, R.; SAUST, F.; FRIEDRICH, B.; MAURER, M.: Nutzung standortbezogener Informationen im Forschungsprojekt KOLINE. In: *Geoinformatik 2012 - Mobilität und Umwelt*. Braunschweig, Deutschland : Shaker Verlag, 2012, S. 33–42
- [BMVI 2014] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI): *Straßenverkehrs-Ordnung*. 2014
- [BMVI 2015] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI): *Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren*. 2015
- [Bohlin 1959] BOHLIN, N. I.: *Sicherheitsgurt für Fahrzeuge, insbesondere Kraftfahrzeuge*. 1959. – Patent DE 1101987
- [Bosch 2011] ROBERT BOSCH GMBH: *Gibt dem Schleudern keine Chance: Das Elektronische Stabilitätsprogramm ESP®*. 2011
- [Broggi u. a. 1999] BROGGI, A.; BERTOZZI, M.; FASCIOLI, A.: ARGO and the MilleMiglia in Automatico Tour. In: *Intelligent Systems and their Applications* 14 (1999), Nr. 1, S. 55–64
- [Broggi u. a. 2013] BROGGI, A.; BUZZONI, M.; DEBATTISTI, S.; GRISLERI, P.; LAGHI, M. C.; MEDICI, P.; VERSARI, P.: Extensive Tests of Autonomous Driving Technologies. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 14 (2013), Nr. 3, S. 1403–1415
- [Brooks 1986] BROOKS, R. A.: A robust layered control system for a mobile robot. In: *Journal of Robotics and Automation* 2 (1986), Nr. 1, S. 14–23
- [Bubb 2015a] BUBB, H.: Einführung. In: BUBB, H. (Hrsg.); BENGLER, K. (Hrsg.); GRÜNEN, R. E. (Hrsg.); VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Springer Vieweg, 2015, S. 1–25
- [Bubb 2015b] BUBB, H.: Das Regelkreisparadigma der Ergonomie. In: BUBB, H. (Hrsg.); BENGLER, K. (Hrsg.); GRÜNEN, R. E. (Hrsg.); VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Springer Vieweg, 2015, S. 26–65
- [Bubb u. a. 2015] BUBB, H.; VOLLRATH, M.; REINPRECHT, K.; MAYER, E.; KÖRBER, M.: Der Mensch als Fahrer. In: BUBB, H. (Hrsg.); BENGLER, K. (Hrsg.); GRÜNEN, R. E. (Hrsg.); VOLLRATH, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Springer Vieweg, 2015, S. 67–162
- [Bubeck u. a. 2012] BUBECK, A.; WEISSHARDT, F.; SING, T.; REISER, U.; HÄGELE, M.; VERL, A.: Implementing best practices for systems integration and distributed software development in service robotics - the Care-O-bot® robot family. In: *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. Fukuoka, Japan : IEEE, 2012, S. 609–614

- [Bundesgesetzblatt 1972] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: Verordnung über die versuchsweise Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen außerhalb geschlossener Ortschaften (Hochgeschwindigkeits-V). In: *Bundesgesetzblatt Teil I* (1972), Nr. 24, S. 461
- [Bundesgesetzblatt 1977] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: Gesetz zu den Übereinkommen vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen. In: *Bundesgesetzblatt Teil II* (1977), Nr. 39, S. 809–1111
- [Bundesgesetzblatt 2013] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: Verordnung zur Neufassung der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). In: *Bundesgesetzblatt Teil I* (2013), Nr. 12, S. 367–427
- [Chatham 2013] CHATHAM, A.: *Google's Self Driving Cars: The Technology, Capabilities, & Challenges*. 2013. – Keynote der Embedded Linux Conference 2013
- [Coleman 1903] COLEMAN, C.: *Means for operating motor-vehicles*. 1903. – Patent US 745,157
- [Conner u. a. 2007] CONNER, D. C.; KRESS-GAZIT, H.; CHOSET, H.; RIZZI, A. A.; PAPPAS, G. J.: Valet parking without a valet. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. San Diego, CA, USA : IEEE, 2007, S. 572–577
- [Daimler 2008] DAIMLER AG: *Mercedes-Benz und die Erfindung des Anti-Blockier-Systems: 1978 ist ABS serienreif*. 2008. – URL <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-657486-49-803841-1-0-0-0-0-0-0-614318-0-1-0-0-0-0-0.html>. – Zugriffsdatum: 23.03.2016
- [Daimler 2009] DAIMLER AG: *Sicherheit ist Programm*. Stuttgart : Daimler Communications, 2009
- [Damböck 2013] DAMBÖCK, D.: *Automationseffekte im Fahrzeug - von der Reaktion zur Übernahme*, Technische Universität München, Dissertation, 2013
- [Dickmanns 2015] DICKMANNS, E. D.: *Persönliche Kommunikation*. 2015
- [Dickmanns 1989] DICKMANNS, E. D.: Subject-object discrimination in 4D dynamic scene interpretation for machine vision. In: *Proceedings of Workshop on Visual Motion*. Irvine, CA, USA : IEEE, 1989, S. 298–304
- [Dickmanns 2002] DICKMANNS, E. D.: The development of machine vision for road vehicles in the last decade. In: *2002 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Versailles, Frankreich : IEEE, 2002, S. 268–281
- [Dickmanns 2007] DICKMANNS, E. D.: *Dynamic Vision for Perception and Control of Motion*. Springer-Verlag London Limited, 2007

- [Dickmanns u. a. 1994] DICKMANN, E. D.; BEHRINGER, R.; DICKMANN, D.; HILDEBRANDT, T.; MAURER, M.; THOMANEK, F.; SCHIEHLEN, J.: The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. In: *1994 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Paris, Frankreich : IEEE, 1994, S. 68–73
- [DIN 10218 2012] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): *DIN EN ISO 10218:2012 Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen*. 2012
- [DIN 50128 2012] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): *DIN EN 50128:2012 - Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme*. 2012
- [DIN EN 61508 2002] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): *DIN EN 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*. 2002
- [DIN IEC 60050 2006] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): *DIN IEC 60050-351 - Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch Teil 351: Leittechnik*. 2006
- [DO-178C 2011] RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS (RTCA): *DO-178C, Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification*. 2011
- [Donges 1978] DONGES, E.: A Two-Level Model of Driver Steering Behavior. In: *Human Factors* 20 (1978), Nr. 6, S. 697–707
- [Donges 1982] DONGES, E.: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobilindustrie* 27 (1982), Nr. 2, S. 183–190
- [Duden: autonom 2016] DUDEN: *Duden / autonom / Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Synonyme, Herkunft*. 2016. – URL <http://www.duden.de/rechtschreibung/autonom#Bedeutungb>. – Zugriffsdatum: 03.04.2016
- [Duden: Sicherheit 2016] DUDEN: *Duden / Sicherheit / Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Synonyme, Herkunft*. 2016. – URL <http://www.duden.de/rechtschreibung/Sicherheit#Bedeutung1>. – Zugriffsdatum: 03.04.2016
- [DVR 2011] DEUTSCHER VERKEHRSSICHERHEITSRAT (DVR): Der Sicherheitsgurt - Lebensretter Nr. 1. In: *Schriftenreihe Verkehrssicherheit* 15 (2011)
- [DWDS: Sicherheit 2016] BERLIN-BRANDENBURGISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN: *Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache des 20. Jahrhunderts: Wortinformation: Sicherheit*. 2016. – URL <http://www.dwds.de/?qu=Sicherheit>. – Zugriffsdatum: 03.04.2016
- [EASA 2013] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA): *EASA LIST OF CLASS OR TYPE RATINGS AEROPLANES*. 2013
- [Edmunds 2016] EDMUNDS.COM, INC.: *Chrysler 300 History*. 2016. – URL <http://www.edmunds.com/chrysler/300/history.html>. – Zugriffsdatum: 03.04.2016

- [Elliott 1973] ELLIOTT, J.: NASA's advanced control law program for the F-8 digital fly-by-wire aircraft. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 22 (1973), Nr. 5, S. 753–757
- [EU EG 631/2009 2009] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: Verordnung (EG) Nr. 631/2009 des europäischen Parlaments und des Rates. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* L 195 (2009)
- [EU EG 661/2009 2009] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des europäischen Parlaments und des Rates. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* L 200 (2009)
- [Europäische Kommission 2011] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *WEISSBUCH Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*. 2011
- [Feil 1987] FEIL, E.: *Antithetik neuzeitlicher Vernunft: „Autonomie-Heteronomie“ und „rational-irrational“*. Vandenhoeck & Ruprecht, 1987 (Forschungen zur Kirchen- und Dogmengeschichte)
- [Fenton 1970] FENTON, R.: Automatic vehicle guidance and control - A state of the art survey. In: *Transactions on Vehicular Technology* 19 (1970), Nr. 1, S. 153–161
- [FGSV 2009] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) - ARBEITSGRUPPE VERKEHRSPLANUNG: *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung*. 2009
- [Fischer und Voges 2011] FISCHER, H.; VOGES, U.: Medizinische Robotersysteme. In: KRAMME, R. (Hrsg.): *Medizintechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 915–926
- [FTM 2004–2014] : *Tagungsunterlagen 1.-3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz, 5.+6. Tagung Fahrerassistenz*. 2004–2014
- [Funke u. a. 2012] FUNKE, J.; THEODOSIS, P.; HINDIYEH, R.; STANEK, G.; KRITATAKIRANA, K.; GERDES, C.; LANGER, D.; HERNANDEZ, M.; MUELLER-BESSLER, B.; HUHNKE, B.: Up to the limits: Autonomous Audi TTS. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Alcalá des Henares, Spanien : IEEE, 2012, S. 541–547
- [Gasser 2015] GASSER, T. M.: Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 543–574
- [Gasser u. a. 2012] GASSER, T. M.; ARZT, C.; AYOUBI, M.; BARTELS, A.; BÜRKLE, L.; EIER, J.; FLEMISCH, F.; HESSE, T.; HUBER, W.; LOTZ, C.; MAURER, M.; RUTH-SCHUMACHER, S.; SCHWARZ, J.; VOGT, W.: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, 2012

- [Gayko 2012] GAYKO, J.: Lane Keeping Support. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 2. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 554–561
- [Geiger u. a. 2012] GEIGER, A.; LAUER, M.; MOOSMANN, F.; RANFT, B.; RAPP, H.; STILLER, C.; ZIEGLER, J.: Team AnnieWAY's Entry to the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2012), Nr. 3, S. 1008–1017
- [Geiser 1985] GEISER, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. In: *ATZ* 87 (1985), S. 77–84
- [Gerdes 2014] GERDES, C.: *Persönliche Kommunikation*. 2014
- [Gerdes und Thornton 2015] GERDES, C.; THORNTON, S. M.: Implementable Ethics for Autonomous Vehicles. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 87–102
- [Geyer u. a. 2014] GEYER, S.; BALTZER, M.; FRANZ, B.; HAKULI, S.; KAUER, M.; KIENLE, M.; MEIER, S.; WEISSGERBER, T.; BENGLER, K.; BRUDER, R.; FLEMISCH, F.; WINNER, H.: Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance. In: *IET Intelligent Transport Systems* 8 (2014), Nr. 3, S. 183–189
- [Ghosh u. a. 2007] GHOSH, D.; SHARMAN, R.; RAGHAV RAO, H.; UPADHYAYA, S.: Self-healing systems - survey and synthesis. In: *Decision Support Systems in Emerging Economies* 42 (2007), Nr. 4, S. 2164–2185
- [Göhring 2012] GÖHRING, D.: *Controller Architecture for the Autonomous Cars: MadeIn-Deutschland and e-Instein*. 2012. – Technischer Bericht
- [Go und Carroll 2004] GO, K.; CARROLL, J. M.: The blind men and the elephant: Views of scenario-based system design. In: *ACM Interactions* 11 (2004), Nr. 6, S. 44–53
- [Goebel u. a. 2008] GOEBL, M.; ALTHOFF, M.; BUSS, M.; FÄRBER, G.; HECKER, F.; HEISSING, B.; KRAUS, S.; NAGEL, R.; LEÓN, F. P.; RATTEI, F.; RUSS, M.; SCHWEITZER, M.; THUY, M.; WANG, C.; WUENSCH, H.: Design and capabilities of the Munich Cognitive Automobiles. In: *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Eindhoven, Niederlande : IEEE, 2008, S. 1101–1107
- [Google Inc. 2015] GOOGLE INC.: Google Self-Driving Car Project Monthly Report - November 2015. 2015. – Forschungsbericht
- [Gottschalk-Mazouz 2008] GOTTSCHALK-MAZOUZ, N.: „Autonomie“ und die Autonomie „autonomer technischer Systeme“. In: *Lebenswelt und Wissenschaft XXI. Deutscher Kongress für Philosophie*. Essen, Deutschland : Deutsche Gesellschaft für Philosophie, 2008, S. 1–12

- [Gotzig und Geduld 2015] GOTZIG, H.; GEDULD, G.: LIDAR-Sensorik. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 317–334
- [Grisleri und Fedriga 2010] GRISLERI, P.; FEDRIGA, I.: The Braive Autonomous Ground Vehicle Platform. In: *7. International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium on intelligent autonomous vehicles (IAV)*. Lecce, Italien : International Federation of Automatic Control, 2010, S. 497–502
- [Grunwald 2015] GRUNWALD, A.: Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren - Analyse, Einordnung und Bewertung. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 661–685
- [Haag 1998] HAAG, M.: *Bildfolgenauswertung zur Erkennung der Absichten von Strassenverkehrsteilnehmern*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1998
- [Harks 2004] HARKS, E.: Der hohe Ölpreis - Anzeichen einer neuen Ölkrise? In: *SWP-Aktuell* 2004/A (2004), Nr. 49
- [Heißing u. a. 2013] HEISSING, B.; ERSOY, M.; GIES, S.: Fahrkomfort. In: HEISSING, B. (Hrsg.); ERSOY, M. (Hrsg.); GIES, S. (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 475–503
- [von Holt und Maurer 2004] HOLT, V. von; MAURER, M.: Aktive Sicherheitssysteme mit maschineller Wahrnehmung - Anforderungen, Potentiale und Einführungshemmnisse. In: *1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*. München, Deutschland : Technische Universität München, 2004
- [Holzmann u. a. 2005] HOLZMANN, F.; BELLINO, M.; KOLSKI, S.; SULZMANN, A.; SPIEGELBERG, G.: Robots go automotive - The SPARC approach. In: *2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Las Vegas, NV, USA : IEEE, 2005, S. 478–483
- [Homeier und Wolf 2011] HOMEIER, K.; WOLF, L.: RoadGraph: High level sensor data fusion between objects and street network. In: *2011 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2011, S. 1380–1385
- [Hörwick 2011] HÖRWICK, M.: *Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme*, Technische Universität München, Dissertation, 2011
- [Hörwick und Siedersberger 2010a] HÖRWICK, M.; SIEDERSBERGER, K.: Aktionspläne zur Erlangung eines sicheren Zustandes bei einem autonomen Stauassistenten. In: *4. Tagung Fahrerassistenz*. München, Deutschland : Technische Universität München, 2010, S. 1–34
- [Hörwick und Siedersberger 2010b] HÖRWICK, M.; SIEDERSBERGER, K.: Strategy and architecture of a safety concept for fully automatic and autonomous driving assistance systems. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, CA, USA : IEEE, 2010, S. 955–960

- [Huang 2008] HUANG, H. M.: *Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework - Volume I: Terminology - Version 2.0 (NIST Special Publication 1011-I-2.0)*. 2008
- [Huang u. a. 2007] HUANG, H. M.; MESSINA, E.; ALBUS, J.: *Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework - Volume II: Framework Models - Version 1.0 (NIST Special Publication 1011-II-1.0)*. 2007
- [IAEA 2012] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Safety of Nuclear Power Plants: Design - Specific Safety Requirements No. SSR-2/1*. Wien, Österreich : International Atomic Energy Agency, 2012
- [Isermann 2006] ISERMANN, R.: *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [Isermann u. a. 2002] ISERMANN, R.; SCHWARZ, R.; STÖLZL, S.: Fault-tolerant drive-by-wire systems. In: *IEEE Control Systems* 22 (2002), Nr. 5, S. 64–81
- [ISO 11270 2014] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO 11270:2014 Intelligent transport systems - Lane keeping assistance systems (LKAS) - Performance requirements and test procedures*. 2014
- [ISO 13482 2014] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO 13482:2014 Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots*. 2014
- [ISO 15622 2010] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO 15622:2010 Intelligent transport systems – Adaptive Cruise Control systems – Performance requirements and test procedures*. 2010
- [ISO 22178 2009] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO 22178:2009 Intelligent transport systems - Low speed following (LSF) systems - Performance requirements and test procedures*. 2009
- [ISO 22179 2009] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO 22179:2009 Intelligent transport systems - Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems - Performance requirements and test procedures*. 2009
- [ISO 22839 2013] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO 22839:2013 Intelligent transport systems - Forward vehicle collision mitigation systems - Operation, performance, and verification requirements*. 2013
- [ISO 26262 2011] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO 26262:2011 Road vehicles – Functional safety*. 2011
- [ISO Guide 51 2014] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *ISO/IEC Guide 51:2014 - Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards*. 2014
- [ITSC 2006–2015] : *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2006–2015

- [IV 2006–2015] : *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2006–2015
- [Jacobs 2012] JACOBS, T.: Freiwillige ISO- und DIN-Normung im Bereich Robotik. In: *Workshop Robotik und Gesetzgebung*. Bielefeld, Deutschland : Universität Bielefeld, 2012
- [Jarke u. a. 1998] JARKE, M.; BUI, X. T.; CARROLL, J. M.: Scenario management: An interdisciplinary approach. In: *Requirements Engineering* 3 (1998), Nr. 3-4, S. 155–173
- [Johansson und Rumar 1971] JOHANSSON, G.; RUMAR, K.: Drivers' brake reaction times. In: *Human Factors* 13 (1971), Nr. 1, S. 23–27
- [Katzwinkel u. a. 2015] KATZWINKEL, R.; BROSIG, S.; SCHROVEN, F.; AUER, R.; ROHLFS, M.; ECKERT, G.; WUTTKE, U.; SCHWITTERS, F.: Einparkassistentz. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 841–850
- [Kim u. a. 2013] KIM, J.; RAJKUMAR, R.; JOCHIM, M.: Towards Dependable Autonomous Driving Vehicles: A System-level Approach. In: *Special Interest Group on Embedded Systems (SIGBED)* 10 (2013), Nr. 1, S. 29–32
- [Kleine-Besten u. a. 2015] KLEINE-BESTEN, T.; KERSKEN, U.; PÖCHMÜLLER, W.; SCHEPERS, H.; MLASKO, T.; BEHRENS, R.; ENGELSBERG, A.: Navigation und Verkehrstelematik. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 1047–1082
- [Kämpchen u. a. 2010] KÄMPCHEN, N.; WALDMANN, P.; HOMM, F.; ARDELT, M.: Umfelderfassung für den Nothalteassistenten - ein System zum automatischen Anhalten bei plötzlich reduzierter Fahrfähigkeit des Fahrers. In: *AAET 2010 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, Deutschland : ITS Niedersachsen, 2010
- [Knoll 2003] KNOLL, A.: Autonomie für situierte Robotersysteme - Stand und Entwicklungslinien. Universität Bielefeld, 2003. – Forschungsbericht
- [Knoll und Christaller 2000] KNOLL, A.; CHRISTALLER, T.: Selbstrepräsentation, Selbstwahrnehmung und Verhaltenssteuerung von Robotern. In: SANDKÜHLER, H. J. (Hrsg.): *Selbstrepräsentation in Natur und Kultur*. Lang, 2000, S. 109–132
- [Kopf 2005] KOPF, M.: Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen? In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, S. 117–139
- [Korn u. a. 2012] KORN, B.; TITTEL, S.; EDINGER, C.: Stepwise integration of UAS in non-segregated airspace - The potential of tailored UAS ATM procedures. In: *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. Herndon, VA, USA : IEEE, 2012, S. 1–8

- [Kramer 2006] KRAMER, F.: *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2006
- [Krüger 1991] KRÜGER, W.: *Situationsmodellierung in der Bildfolgenauswertung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991
- [Kriso u. a. 2013] KRISO, S.; HAMANN, R.; GEBAUER, C.: Die Item Definition der ISO 26262 - Unangenehme Auswirkungen bei ungeschickter Wahl der Systemgrenze. In: *VDI-Berichte Nr. 2188* (2013)
- [Kritayakirana und Gerdes 2012] KRITAYAKIRANA, K.; GERDES, J. C.: Autonomous vehicle control at the limits of handling. In: *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 10 (2012), Nr. 4, S. 271–296
- [Lerner u. a. 2015] LERNER, M.; SCHEPERS, A.; PÖPPEL-DECKER, M.; LEIPNITZ, C.; FITSCHEN, A.: *Voraussichtliche Entwicklung von Unfallanzahlen und Jahresfahrleistungen in Deutschland - Ergebnisse 2015*. 2015
- [Levinson u. a. 2011] LEVINSON, J.; ASKELAND, J.; BECKER, J.; DOLSON, J.; HELD, D.; KAMMEL, S.; KOLTER, J. Z.; LANGER, D.; PINK, O.; PRATT, V.; SOKOLSKY, M.; STANEK, G.; STAVENS, D.; TEICHMAN, A.; WERLING, M.; ; THRUN, S.: Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. In: *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Baden-Baden, Deutschland : IEEE, 2011, S. 163–168
- [Lie u. a. 2004] LIE, A.; TINGVALL, C.; KRAFFT, M.; KULLGREN, A.: The Effectiveness of ESP (Electronic Stability Program) in Reducing Real Life Accidents. In: *Traffic Injury Prevention* 5 (2004), Nr. 1, S. 37–41
- [Lin 2015] LIN, P.: Why Ethics Matters for Autonomous Cars. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 69–85
- [Lutz u. a. 2012] LUTZ, L.; TANG, T.; LIENKAMP, M.: Analyse der rechtlichen Situation von teleoperierten und autonomen Fahrzeugen. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München, Deutschland : Technische Universität München, 2012
- [Mackworth 1961] MACKWORTH, N. H.: Researches on the Measurement of Human Performance. In: *Selected Papers on Human Factors in the Design and Use of Control Systems* (1961), S. 174–331
- [Malta u. a. 2012] MALTA, L.; AUST, M. L.; FABER, F.; METZ, B.; SAINT PIERRE, G.; BENMIMOUN, M.; SCHÄFER, R.; GUSTAFSSON, D.; PÜTZ, A.; DOZZA, M.; ZHOLUD, D.: *Response 3 - Deliverable 6.4 Final results: Impacts on traffic safety*. 2012
- [Matthaei 2015] MATTHAEI, R.: *Wahrnehmungsgestützte Lokalisierung in fahrstreifengenauen Karten für Fahrerassistenzsysteme und automatisches Fahren in urbaner Umgebung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2015

- [Matthaei u. a. 2015] MATTHAEI, R.; RESCHKA, A.; RIEKEN, J.; DIERKES, F.; ULBRICH, S.; WINKLE, T.; MAURER, M.: Autonomes Fahren. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 1139–1165
- [Maurer 2000] MAURER, M.: *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnern*. VDI-Verlag, 2000
- [Maurer 2012] MAURER, M.: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 2. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 43–54
- [Maurer 2014] MAURER, M.: *Persönliche Kommunikation*. 2014
- [Maurer 2015a] MAURER, M.: Einleitung. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 1–8
- [Maurer 2015b] MAURER, M.: *Persönliche Kommunikation*. 2015
- [Maurer 2015c] MAURER, M.: *Skript zur Vorlesung Fahrerassistenzsysteme*. 2015
- [Maurer 2016] MAURER, M.: *Persönliche Kommunikation*. 2016
- [Maurer u. a. 2015] MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015
- [Meroth u. a. 2008] MEROTH, A.; TOLG, B.; PLAPPERT, C.: Einführung. In: *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug*. Vieweg, 2008, S. 1–6
- [Mesarović u. a. 1970] MESAROVIĆ, M.; MACKO, D.; TAKAHARA, Y.: *Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems*. Academic Press, 1970 (Mathematics in science and engineering)
- [Mirwaldt u. a. 2012] MIRWALDT, P.; BARTELS, A.; LEMMER, K.: Gestaltung eines Notfallassistenzsystems bei medizinisch bedingter Fahruntfähigkeit. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München, Deutschland : Technische Universität München, 2012
- [Mitschke und Wallentowitz 2014] MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- [Mock-Hecker 1994] MOCK-HECKER, R.: *Wissensbasierte Erkennung kritischer Verkehrssituationen: Erkennung von Plankonflikten*. VDI-Verlag, 1994
- [Mörbe 2015] MÖRBE, M.: Fahrdynamiksensoren für FAS. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 223–242
- [Muller u. a. 2003] MULLER, S.; UCHANSKI, M.; HEDRICK, K.: Estimation of the maximum tire-road friction coefficient. In: *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 125 (2003), Nr. 4, S. 607–617

- [Nagel und Enkelmann 1991] NAGEL, H.; ENKELMANN, W.: Generic Road Traffic Situations and Driver Support Systems. In: *Proceedings of the 5th Prometheus Workshop*. München, Deutschland : Prometheus Office, 1991, S. 76–85
- [NDMV 2012] NEVADA DEPARTMENT OF MOTOR VEHICLES (NDMV): *Adopted Regulation of the Department of Motor Vehicles LCB File No. R084-11*. 2012
- [NHTSA 2013] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA): *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. 2013
- [NHTSA 2016] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA): *Early Estimate of Motor Vehicle Traffic Fatalities for the First Nine Months (Jan-Sep) of 2015*. 2016
- [Norman und Bobrow 1975] NORMAN, D. A.; BOBROW, D. G.: On data-limited and resource-limited processes. In: *Cognitive Psychology* 7 (1975), Nr. 1, S. 44 – 64
- [Nothdurft 2014] NOTHDURFT, T.: *Ein Kontextmodell für sicherheitsrelevante Anwendungen in der autonomen Fahrzeugführung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2014
- [Nothdurft u. a. 2011] NOTHDURFT, T.; HECKER, P.; OHL, S.; SAUST, F.; MAURER, M.; RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.: Stadtpilot: First fully autonomous test drives in urban traffic. In: *2011 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Washington DC, USA : IEEE, 2011, S. 919–924
- [Ohl 2014] OHL, S.: *Fusion von Umfeld wahrnehmenden Sensoren in städtischer Umgebung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2014
- [OSHA 2006] OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA): *OSHA Technical Manual (OTM) Section IV: Chapter 4 Industrial Robots and Robot System Safety*. 2006
- [Oxford: scenario 2016] OXFORD UNIVERSITY PRESS: *Oxford Dictionaries: Wortinformation: scenario*. Oxford University Press, 2016. – URL <https://www.oxforddictionaries.com/definition/english/scenario>. – Zugriffsdatum: 03.04.2016
- [Pascoe und Eichorn 2009] PASCOE, R. D.; EICHORN, T. N.: What is communication-based train control? In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 4 (2009), Nr. 4, S. 16–21
- [Pellkofer 2003] PELLKOFER, M.: *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003
- [Rammert 2003] RAMMERT, W.: Technik in Aktion: verteiltes Handeln in soziotechnischen Konstellationen. In: *Technical University Technology Studies Working Papers TUTS-WP-2-2003* (2003)
- [Rasmussen 1983] RASMUSSEN, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 13 (1983), Nr. 3, S. 257–266

- [Raste 2015] RASTE, T.: Fahrdynamikregelung mit Brems- und Lenkeingriff. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 755–766
- [Rauch u. a. 2012] RAUCH, S.; AEGERHARD, M.; ARDELT, M.; KÄMPCHEN, N.: Autonomes Fahren auf der Autobahn - eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München, Deutschland : Technische Universität München, 2012
- [Rauskolb u. a. 2008] RAUSKOLB, F. W.; BERGER, K.; LIPSKI, C.; MAGNOR, M.; CORNELSEN, K.; EFFERTZ, J.; FORM, T.; GRAEFE, F.; OHL, S.; SCHUMACHER, W.; WILLE, J.; HECKER, P.; NOTHDURFT, T.; DOERING, M.; HOMEIER, K.; MORGENROTH, J.; WOLF, L.; BASARKE, C.; BERGER, C.; GÜLKE, T.; KLOSE, F.; RUMPE, B.: Caroline: An autonomously driving vehicle for urban environments. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 674–724
- [Reichardt 1996] REICHARDT, D. M.: *Kontinuierliche Verhaltenssteuerung eines autonomen Fahrzeugs in dynamischer Umgebung*, Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1996
- [Reichardt 1998] REICHARDT, D. M.: Using Automated Assistance Systems - Putting The Driver Into Focus. In: *1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*. Stuttgart, Deutschland : IEEE, 1998, S. 413–418
- [Reichel u. a. 2010] REICHEL, M.; BOTSCH, M.; RAUSCHECKER, R.; SIEDERSBERGER, K.; MAURER, M.: Situation aspect modelling and classification using the Scenario Based Random Forest algorithm for convoy merging situations. In: *2010 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2010, S. 360–366
- [Reif 2010] REIF, K.: *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2010
- [Reschka 2015] RESCHKA, A.: Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 489–513
- [Reschka u. a. 2015] RESCHKA, A.; BAGSCHIK, G.; ULBRICH, S.; NOLTE, M.; MAURER, M.: Ability and skill graphs for system modeling, online monitoring, and decision support for vehicle guidance systems. In: *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Seoul, Korea : IEEE, 2015, S. 933–939
- [Reschka u. a. 2012] RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.; NOTHDURFT, T.; HECKER, P.; LICHT, B.; MAURER, M.: A Surveillance and Safety System based on Performance Criteria and Functional Degradation for an Autonomous Vehicle. In: *2012 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Anchorage, AK, USA : IEEE, 2012, S. 237–242

- [Reschka und Maurer 2015] RESCHKA, A.; MAURER, M.: Conditions for a safe state of automated road vehicles. In: *it - information technology* 57 (2015), Nr. 4, S. 215–222
- [Reschka u. a. 2014] RESCHKA, A.; NOLTE, M.; STOLTE, T.; SCHLATOW, J.; ERNST, R.; MAURER, M.: Specifying a middleware for distributed embedded vehicle control systems. In: *2014 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. Hyderabad, Indien : IEEE, 2014, S. 117–122
- [Response 2009] RESPONSE 3 PROJECT CONSORTIUM: *Integrated Project PReVENT, horizontal activity RESPONSE 3, updated version 5.0 Code of practice for the design and evaluation of ADAS*. 2009. – URL http://www.acea.be/index.php/files/code_of_practice_for_the_design_and_evaluation_of_adas/. – Zugriffsdatum: 04.04.2016
- [Robert Bosch GmbH 2007] ROBERT BOSCH GMBH: *40 Jahre elektronische Benzineinspritzung*. Stuttgart : Corporate Communications, 2007
- [Romanycia und Pelletier 1985] ROMANYCIA, M. J.; PELLETIER, F. J.: What is a heuristic? In: *Computational Intelligence* 1 (1985), Nr. 1, S. 47–58
- [SAE 2014] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE): *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems J3016*. 2014
- [Saust u. a. 2012] SAUST, F.; WILLE, J. M.; MAURER, M.: Energy-optimized driving with an autonomous vehicle in urban environments. In: *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*. Yokohama, Japan : IEEE, 2012, S. 1–5
- [Schmidt u. a. 2014] SCHMIDT, M. T.; HOFFMANN, U.; BOUZOURAA, M. E.: A Novel Goal Oriented Concept for Situation Representation for ADAS and Automated Driving. In: *2014 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2014, S. 886–893
- [Schnürmacher u. a. 2013] SCHNÜRMACHER, M.; GÖHRING, D.; WANG, M.; GANJINEH, T.: High Level Sensor Data Fusion of Radar and Lidar for Car-Following on Highways. In: SEN GUPTA, G. (Hrsg.); BAILEY, D. (Hrsg.); DEMIDENKO, S. (Hrsg.); CARNEGIE, D. (Hrsg.): *Recent Advances in Robotics and Automation* Bd. 480. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 217–230
- [Schopper u. a. 2013] SCHOPPER, M.; HENLE, L.; WOHLAND, T.: Intelligent Drive - Vernetzte Intelligenz für mehr Sicherheit. In: *ATZextra* 18 (2013), Nr. 5, S. 106–114
- [Schuldt 2016] SCHULDT, F.: *Ein Beitrag für den methodischen Test von automatischen Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2016. – angekündigt
- [Sherman 2010] SHERMAN, D.: *Sudden Acceleration: The Early Years*. 2010. – URL http://www.automobilemag.com/features/news/1003_sudden_acceleration_the_early_years/. – Zugriffsdatum: 03.04.2016
- [Shladover 2007] SHLADOVER, S.: PATH at 20 - History and Major Milestones. In: *Transactions on Intelligent Transportation Systems* 8 (2007), Nr. 4, S. 584–592

- [Siciliano und Khatib 2008] SICILIANO, B. (Hrsg.); KHATIB, O. (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- [Siedersberger 2003] SIEDERSBERGER, K.: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003
- [Singh 2008a] SINGH, S. (Hrsg.): *Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part I (Bd. 25)*. Wiley Subscription Services, Inc., 2008
- [Singh 2008b] SINGH, S. (Hrsg.): *Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part II (Bd. 26)*. Wiley Subscription Services, Inc., 2008
- [Singh 2008c] SINGH, S. (Hrsg.): *Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part III (Bd. 27)*. Wiley Subscription Services, Inc., 2008
- [Stanek u. a. 2010] STANEK, G.; LANGER, D.; MÜLLER-BESSLER, B.; HUHNKE, B.: Junior 3: A test platform for Advanced Driver Assistance Systems. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, CA, USA : IEEE, 2010, S. 143–149
- [Statistisches Bundesamt 2015a] STATISTISCHES BUNDESAMT: Verkehr aktuell. In: *Fachserie 8 Reihe 1.1* (2015)
- [Statistisches Bundesamt 2015b] STATISTISCHES BUNDESAMT: Verkehrsunfälle Oktober 2014. In: *Fachserie 8 Reihe 7* (2015)
- [Statistisches Bundesamt 2016] STATISTISCHES BUNDESAMT: Verkehr aktuell. In: *Fachserie 8 Reihe 1.1* (2016)
- [Steinhardt 2014] STEINHARDT, N.: *Eine Architektur zur Schätzung kinematischer Fahrzeuggrößen mit integrierter Qualitätsbewertung durch Sensordatenfusion*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2014
- [Stiller 2005] STILLER, C.: Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: MAURER, M. (Hrsg.); STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, S. 1–20
- [Stolte u. a. 2015] STOLTE, T.; BAGSCHIK, G.; RESCHKA, A.; MAURER, M.: Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen (aFAS). In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel 2015 (AAET)*. Braunschweig, Deutschland : ITS Niedersachsen, 2015, S. 370–390
- [Strasser 2012] STRASSER, P. B.: *Vernetzung von Test- und Simulationenmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*, Technische Universität München, Dissertation, 2012
- [Thomason und Gonzalez 1985] THOMASON, M. G.; GONZALEZ, R. C.: Data Structures and Databases in Digital Scene Analysis. In: *Advances in Information Systems Science* Bd. 9. Springer US, 1985, S. 1–47

- [Thorpe u. a. 2007] THORPE, C.; JOCHEM, T.; POMERLEAU, D.: The 1997 automated highway free agent demonstration. In: *IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Boston, MA, USA : IEEE, 2007, S. 496 – 501
- [Thuy u. a. 2008] THUY, M.; GOEBL, M.; RATTEI, F.; ALTHOFF, M.; OBERMEIER, F.; HAWE, S.; NAGEL, R.; KRAUS, S.; WANG, C.; HECKER, F.; RUSS, M.; SCHWEITZER, M.; LEON, F.; FÄRBER, G.; BUSS, M.; DIEPOLD, K.; EBERSPÄCHER, J.; HEISSING, B.; WÜNSCHE, H.: Kognitive Automobile - Neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereichs/TR28. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching b. München, Deutschland : Technische Universität München, 2008
- [Timpe 2001] TIMPE, K.: Fahrzeugführung: Anmerkungen zum Thema. In: JÜRGENSOHN, T. (Hrsg.); TIMPE, K. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, S. 9–27
- [Tölle 1996] TÖLLE, W.: *Ein Fahrmanöverkonzept für einen menschlichen Kopiloten*. VDI-Verlag, 1996
- [To und Bartels 2010] TO, T. B.; BARTELS, A.: *Deliverable D53.3 Temporary Auto Pilot: 1st System Functionality*. 2010
- [Tsugawa 1994] TSUGAWA, S.: Vision-based vehicles in Japan: machine vision systems and driving control systems. In: *Transactions on Industrial Electronics* 41 (1994), Nr. 32, S. 398–405
- [Ulbrich und Maurer 2013] ULBRICH, S.; MAURER, M.: Probabilistic online POMDP decision making for lane changes in fully automated driving. In: *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*. Den Haag, Niederlande : IEEE, 2013, S. 2063–2067
- [Ulbrich 2011] ULBRICH, S.: *Intelligent Decision Making and Maneuver Planning for Autonomous Driving in Urban Traffic Environments*, Technische Universität Braunschweig, Masterarbeit, 2011
- [Ulbrich 2016] ULBRICH, S.: *Towards Tactical Lane Change Behavior Planning for Automated Vehicles*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2016. – angekündigt
- [Ulbrich u. a. 2014] ULBRICH, S.; NOTHDURFT, T.; MAURER, M.; HECKER, P.: Graph-Based Context Representation, Environment Modeling and Information Aggregation for Automated Driving. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, 2014, S. 541–547
- [Ulbrich u. a. 2015a] ULBRICH, S.; RESCHKA, A.; MENZEL, T.; SCHULDT, F.; MAURER, M.: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation and Scenario for Automated Driving. In: *2015 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Las Palmas, Spanien : IEEE, 2015, S. 982–988

- [Ulbrich u. a. 2015b] ULBRICH, S.; RESCHKA, A.; MENZEL, T.; SCHULDT, F.; MAURER, M.: Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting, Deutschland : Uni-DAS e.V., 2015, S. 105–118
- [Ulmer 1992] ULMER, B.: VITA-an autonomous road vehicle (ARV) for collision avoidance in traffic. In: *1992 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Detroit, MI, USA : IEEE, 1992, S. 36–41
- [Ulmer 1994] ULMER, B.: VITA II-active collision avoidance in real traffic. In: *1994 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Paris, Frankreich : IEEE, 1994, S. 1–6
- [UN 2014a] UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COUNCIL - INLAND TRANSPORT COMMITTEE - WORKING PARTY ON ROAD TRAFFIC SAFETY: *Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety*. 2014
- [UN 2014b] UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COUNCIL - INLAND TRANSPORT COMMITTEE - WORKING PARTY ON ROAD TRAFFIC SAFETY: *Treaty C.N.569.2014.TREATIES-XI.B.19 - Convention on road traffic - Vienna, 8 November 1968 - Proposal of amendments to articles 8 and 39 of the convention*. 2014
- [UN ECE-R79 2005] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE OF THE UNITED NATIONS (UN/ECE): *Addendum 78: Regulation No. 79: Uniform provisions concerning the approval of Vehicles with regard to steering equipment*. 2005
- [Urmson 2012] URMSON, C.: *Realizing Self-Driving Vehicles*. 2012. – Keynote des 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)
- [Vasic und Billard 2013] VASIC, M.; BILLARD, A.: Safety Issues in Human-Robot Interactions. In: *2013 IEEE-RAS International Conference on Robotics and Automation*. Karlsruhe, Deutschland : IEEE, 2013, S. 197–204
- [VDA 2015] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V. (VDA): *Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. 2015
- [VDI 2206 2004] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): *VDI-Richtlinien - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. 2004
- [Vision Zero 2010] THE VISION ZERO INITIATIVE: *Vision Zero - Long Presentation*. 2010
- [Wachenfeld und Winner 2015] WACHENFELD, W.; WINNER, H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 439–464
- [Wachenfeld u. a. 2015] WACHENFELD, W.; WINNER, H.; GERDES, C.; LENZ, B.; MAURER, M.; BEIKER, S. A.; FRÄDRICH, E.; WINKLE, T.: Use-cases des autonomen Fahrens. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 9–37

- [Waltz 1950] WALTZ, G. H.: Making the Death Seat Safer. In: *Popular Science* 137 (1950), Nr. 1
- [Wershofen und Graefe 1996] WERSHOFEN, K. P.; GRAEFE, V.: Situationserkennung als Grundlage der Verhaltenssteuerung eines mobilen Roboters. In: SCHMIDT, G. (Hrsg.); FREYBERGER, F. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 1996 12. Fachgespräch München*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996, S. 170–179
- [Wille 2012] WILLE, J. M.: *Manöverübergreifende autonome Fahrzeugführung in innerstädtischen Szenarien am Beispiel des Stadtpilotprojekts*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2012
- [Wille u. a. 2009] WILLE, J. M.; MATTHAEI, R.; OHL, S.; SAUST, F.; MAURER, M.; SCHUMACHER, W.; HOMEIER, K.; NOTHDURFT, T.; SASSE, A.; HECKER, P.; WOLF, L.: Der Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *AAET 2009, Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, Deutschland : ITS Niedersachsen, 2009, S. 27–47
- [Wille u. a. 2010] WILLE, J. M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Stadtpilot: Driving autonomously on Braunschweig’s inner ring road. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. San Diego, CA, USA : IEEE, 2010, S. 506–511
- [Winkle 2015] WINKLE, T.: Berücksichtigung technischer, rechtlicher sowie ökonomischer Risiken beim Entwicklungs- und Freigabeprozess automatisierter Fahrzeuge. In: MAURER, M. (Hrsg.); GERDES, C. (Hrsg.); LENZ, B. (Hrsg.); WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg, 2015, S. 611–635
- [Winner 2015] WINNER, H.: Quo vadis, FAS? In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 1167–1186
- [Winner u. a. 2015] WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015
- [Winner und Schopper 2015] WINNER, H.; SCHOPPER, M.: Adaptive Cruise Control. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 851–892
- [Winner 2012] WINNER, H.: *Persönliche Kommunikation*. 2012
- [Wirtz 2014] WIRTZ, M. A. (Hrsg.): *Dorsch - Lexikon der Psychologie*. 17. Auflage. Bern, Schweiz : Verlag Hans Huber, 2014. – URL <https://portal.hogrefe.com/dorsch/de/startseite/>. – Zugriffsdatum: 03.04.2016. – Online verfügbar
- [WNA 2014] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA): *Fukushima Accident*. 2014
- [Woodman u. a. 2010] WOODMAN, R.; WINFIELD, A. F.; HARPER, C.; FRASER, M.: Safety control architecture for personal robots: Behavioural suppression with deliberative control. In: *The Seventh IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments*. Toulouse, Frankreich : IARP, 2010

- [Woodman u. a. 2012] WOODMAN, R.; WINFIELD, A. F.; HARPER, C.; FRASER, M.: Building safer robots: Safety driven control. In: *The International Journal of Robotics Research* 31 (2012), Nr. 13, S. 1603–1626
- [Yasunobu und Miyamoto 1985] YASUNOBU, S.; MIYAMOTO, S.: Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control. In: *Industrial Applications of Fuzzy Control* 1 (1985), Nr. 18, S. 1–18
- [Yeh 2013] YEH, Y.: Triple-triple redundant 777 primary flight computer. In: *IEEE Aerospace Applications Conference*. Aspen, CO, USA : IEEE, 2013, S. 293–307
- [Yerkes und Dodson 1908] YERKES, R. M.; DODSON, J. D.: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. In: *Journal of Comparative Neurology and Psychology* 18 (1908), S. 459–482
- [van Zanten und Kost 2015] ZANTEN, A. van; KOST, F.: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 3. Auflage. Springer Vieweg, 2015, S. 723–754
- [Zhang u. a. 2006] ZHANG, Y.; ANTONSSON, E. K.; GROTE, K.: A new threat assessment measure for collision avoidance systems. In: *2006 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Toronto, Canada : IEEE, 2006, S. 968–975
- [Ziegler u. a. 2014] ZIEGLER, J.; BENDER, P.; LATEGAHN, H.; SCHREIBER, M.; STRAUSS, T.; STILLER, C.: Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Bertha-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting, Deutschland : Uni-DAS e.V., 2014, S. 79–93